HARVARD MEDICAL LIBRARY

RÖNTGEN

THE LLOYD E. HAWES COLLECTION IN THE HISTORY OF RADIOLOGY

Harvard Medical Library in the Francis A. Countway Library of Medicine ~ *Boston*

VERITATEM PER MEDICINAM QUÆRAMUS

SUR LES PROGRÈS

DE LA

SCIENCE ÉLECTRIQUE

ET LES

NOUVELLES MACHINES D'INDUCTION.

Extrait du *Mémorial de l'Officier du Génie*, n° 26.

SUR LES PROGRÈS

DE LA

SCIENCE ÉLECTRIQUE

ET LES

NOUVELLES MACHINES D'INDUCTION,

Par J. BOULANGER,

CAPITAINE DU GÉNIE.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY PHYSICS DEPARTMENT

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Augustins, 55.

—

1885

(Tous droits réservés.)

Digitized by the Internet Archive
in 2011 with funding from
Open Knowledge Commons and Harvard Medical School

http://www.archive.org/details/surlesprogrsdela00boul

SUR LES PROGRÈS

DE LA

SCIENCE ÉLECTRIQUE

ET LES

NOUVELLES MACHINES D'INDUCTION.

Parmi les différentes sciences au développement desquelles il nous est donné d'assister, l'électricité est sans contredit l'une de celles dont les progrès ont été les plus marqués, depuis un petit nombre d'années; ce n'est plus une simple branche de la Physique, ne sortant pas du laboratoire et envisagée seulement comme une propriété curieuse de la matière; grâce à la découverte de machines relativement puissantes, elle a pénétré dans le domaine de l'industrie, ses applications se multiplient tous les jours et elle est devenue assez importante pour constituer à elle seule une science particulière, la science électrique. Or il n'est pas douteux que la plupart de ces applications devenues industrielles ne puissent également profiter à l'art de la guerre; il suffit, pour s'en convaincre, de se rappeler qu'elles comprennent l'éclairage, la téléphonie, le transport de la force. Il devient donc indispensable aujourd'hui de posséder les connaissances théoriques permettant de réaliser ces applications d'une manière rationnelle.

Nous devons tout d'abord faire remarquer que l'emploi du calcul est devenu indispensable pour traiter d'une manière complète une question quelconque d'électricité. Il ne s'agit

plus seulement en effet de réaliser des expériences curieuses et intéressantes au point de vue théorique; il faut avant tout, pour une application industrielle, se préoccuper de la question économique, se rendre compte de toutes les actions, mesurer tous les résultats, de manière à obtenir le maximum de production avec le minimum de dépense : le calcul seul permet d'y arriver.

Depuis longtemps déjà, plusieurs savants, dans un but purement spéculatif, avaient appliqué le calcul à l'électricité; après être restés ignorés du plus grand nombre pendant plus d'un demi-siècle, leurs travaux furent mis au jour, étudiés à nouveau et finalement en arrivèrent à constituer ce que l'on est convenu d'appeler les nouvelles théories électriques. Ces théories commencent à peine à pénétrer dans l'enseignement et bien que, depuis quelques années, les Ouvrages publiés sur l'électricité et ses applications soient nombreux, aucun d'eux ne permet de se les assimiler facilement et surtout rapidement; car, parmi ces Ouvrages, les uns uniquement théoriques ne renferment que la partie mathématique abstraite, sans s'occuper des applications; les autres sont des Ouvrages de vulgarisation décrivant sommairement les faits, sans les expliquer d'une manière complète. Enfin, un grand nombre de principes utiles pour la pratique se trouvent disséminés dans les journaux scientifiques, où il devient souvent fort difficile de les retrouver.

Il nous a dès lors paru utile de résumer aussi brièvement que possible l'ensemble des théories admises aujourd'hui sur l'électricité. Tel est l'objet du présent travail : le premier Chapitre, consacré à la partie théorique, définit successivement les diverses grandeurs qui entrent dans les formules relatives à l'emploi de l'électricité et se termine par l'exposé du système des unités adoptées pour mesurer ces grandeurs. Le deuxième Chapitre renferme la description des différents types des machines les plus employées aujourd'hui pour la production de l'électricité. Enfin le troisième Chapitre traite

des propriétés générales de ces machines et des principes théoriques qui doivent présider à leur construction.

Malheureusement la théorie est encore loin d'être complète à ce sujet, les actions complexes qui se produisent dans le fonctionnement des machines n'ont pu encore être toutes soumises à l'analyse et, dans bien des cas, il faut s'en rapporter à l'expérience. Telle qu'elle est, la théorie n'est pas inutile, car elle a permis de guider les tâtonnements et elle permet encore chaque jour de juger des qualités ou des défauts que présenterait une machine, si l'on voulait l'employer à un usage déterminé.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES ET DÉFINITIONS. — UNITÉS.

Expériences de Coulomb. — Le point de départ des théories actuelles sur l'électricité se trouve dans les mémorables expériences faites par Coulomb au moyen de sa balance de torsion. Depuis longtemps on savait que certains corps jouissaient de la propriété de *s'électriser* par le frottement et d'attirer les corps légers. Plus tard on s'aperçut qu'en prenant des précautions convenables tous les corps sont susceptibles d'acquérir cette propriété, mais qu'ils jouissent de caractères différents au point de vue de la transmission de l'électricité ; d'où une classification des corps en *conducteurs* et *isolants*. A la vérité, on ne connaît pas de corps absolument isolants, c'est-à-dire s'opposant d'une manière complète au passage de l'électricité, de même qu'il n'y a pas non plus de conducteurs parfaits, dans lesquels la transmission électrique soit instantanée. On pourrait par suite trouver des corps n'appartenant pas d'une façon bien nette à l'une ou l'autre catégorie ; mais, si l'on envisage seulement les extrêmes, on peut dire qu'il existe des corps nommés *conducteurs,* dans lesquels les phénomènes électriques sont assez rapides pour qu'on n'ait à considérer que ce qui se passe lorsque l'équilibre est établi, tandis que dans d'autres, au contraire,

les modifications électriques sont assez lentes pour qu'on puisse les négliger et considérer alors ces corps comme des isolants parfaits. Ce sont ces derniers qui ont été désignés par Faraday sous le nom de *diélectriques*.

On savait également que l'électricité se manifeste de deux manières différentes, ce qu'on exprime en disant qu'il y a deux espèces d'électricité qui, nommées d'abord électricité *vitrée* et électricité *résineuse,* sont habituellement désignées aujourd'hui sous les noms d'électricité *positive* et d'électricité *négative*.

L'expérience montre d'ailleurs qu'il n'y en a que deux et de plus indique cette propriété fondamentale que deux corps chargés d'électricité de même nom se repoussent, tandis que deux corps chargés d'électricité de noms contraires s'attirent.

Il existe donc entre deux corps électrisés des forces soit attractives, soit répulsives. Ce sont ces actions qui ont été étudiées par Coulomb, au moyen de sa balance de torsion. En choisissant des corps de petites dimensions, relativement à leur distance, et admettant que l'action qui s'exerce entre eux est dirigée suivant la droite qui les joint, Coulomb a vérifié que cette action, quel que soit d'ailleurs son sens, varie en raison inverse du carré de la distance. Dans les expériences de Coulomb, l'intensité de la force était déduite de la valeur du couple de torsion du fil qui soutenait l'aiguille mobile. On peut du reste mesurer directement cette force avec une balance ordinaire, en suspendant une des boules électrisées à l'un des plateaux et équilibrant l'action électrique avec des poids placés dans l'autre plateau (balance de Harris).

Quantité ou masse électrique. — Mais les expériences de Coulomb n'ont pas seulement porté sur la relation existant entre les forces et la distance des deux corps électrisés ; elles

ont montré en outre que les actions électriques sont proportionnelles aux *quantités* d'électricité que possède chacun des deux corps mis en présence, de sorte que, si q, q' sont ces quantités, r la distance et f l'intensité de la force, la loi de Coulomb peut être exprimée par la formule

$$f = k\frac{qq'}{r^2},$$

k étant un coefficient qui reste constant lorsqu'on se contente de faire varier q, q' et r.

On est donc amené à considérer une première grandeur électrique : c'est la *quantité*. Avant de montrer comment Coulomb arrivait à la notion de la quantité électrique, nous remarquerons d'abord qu'il n'est pas nécessaire, pour l'acquérir, d'être fixé sur la nature de l'électricité. Bien qu'on ne soit guère plus avancé qu'autrefois sur ce sujet, on sait cependant que la théorie des fluides, aussi bien celle des deux fluides de Symmer que celle du fluide unique de Franklin, ne correspond probablement à rien de réel. On est donc conduit, comme on l'a fait pour la chaleur et la lumière, à abandonner l'idée d'un agent spécial produisant les phénomènes électriques et à les considérer comme résultant uniquement des modifications de l'éther, cette substance qui remplit tout l'espace et dont les phénomènes calorifiques et lumineux ont démontré l'existence. Quant à la manière dont se produit cette modification, nous en sommes réduits aux hypothèses, les uns admettant de simples transformations de mouvement, les autres supposant un transport réel ou bien encore une condensation de l'éther, retombant ainsi sur la théorie de Franklin dans laquelle le fluide électrique ne serait autre chose que l'éther lui-même.

Ce qui surtout a fait abandonner les théories anciennes, c'est qu'elles reposent sur les actions à distance. Or cette propriété est une de celles que l'esprit se refuse à admettre

et, si nous concevons aisément des actions se transmettant de proche en proche, nous ne pouvons guère nous faire une idée nette de corps agissant à distance les uns sur les autres à travers des milieux complètement inertes.

Il ne faut pas d'ailleurs citer l'attraction universelle comme preuve des actions à distance et Newton lui-même n'a pas dit : « les corps s'attirent », mais « les choses se passent comme si les corps s'attiraient suivant certaines lois ». Il est donc probable que l'attraction des corps célestes à distance n'est qu'une illusion et se produit en réalité par des déformations du milieu interposé.

Ces considérations, généralement admises aujourd'hui, n'empêchent pas que l'on n'ait conservé dans le langage les termes introduits par l'hypothèse de Symmer. On peut le faire sans inconvénient, à la condition toutefois de bien définir les propriétés mathématiques ou expérimentales auxquelles ils correspondent, et alors, comme le disait Coulomb, ils ont simplement pour but de présenter, avec le moins d'éléments possible, les résultats du calcul et de l'expérience et non d'indiquer les véritables causes de l'électricité.

Voici, du reste, ce qu'écrivait à ce sujet M. Blavier [1] :

« Quoi qu'il en soit, l'hypothèse des deux fluides électriques, si elle ne représente pas la véritable cause des phénomènes électriques, n'en est pas moins l'expression d'une loi élémentaire qui résulte de l'expérience et, à ce titre, rien ne s'oppose à ce qu'elle soit conservée dans le langage et à ce qu'on lui applique l'analyse mathématique, pourvu qu'on n'attache pas aux mots électricité *positive* et *négative* l'idée de deux fluides d'une nature spéciale, mais celle de deux états particuliers des corps, états mesurables par leurs effets.

---

[1] *Des grandeurs électriques et de leur mesure en unités absolues*, par M. E. Blavier (*Annales télégraphiques*, 1874, p. 181).

De même que, si l'on arrivait un jour à trouver la véritable cause de l'attraction universelle, on n'en appliquerait pas moins la loi de Newton au mouvement des corps célestes. »

Revenons maintenant à la quantité ou masse électrique. Prenons deux corps matériellement identiques, deux sphères, par exemple a, b, et, après les avoir électrisées, introduisons-les successivement dans la balance de Coulomb, dont l'aiguille mobile est elle-même électrisée. Ou bien les actions mesurées par la torsion du fil sont les mêmes dans les deux expériences, et on dit alors que les sphères a et b possèdent des quantités égales d'électricité, ou bien les actions diffèrent et l'on dit que les quantités d'électricité formant les charges de a et b sont différentes.

Pour vérifier la proportionnalité annoncée plus haut, Coulomb, après avoir mesuré l'effort exercé par la sphère a, touchait celle-ci avec la sphère b primitivement ramenée à l'état neutre et les séparait de nouveau. L'électricité de a se partageait entre les deux sphères et alors, admettant que la charge de a était diminuée de moitié, il constatait que la force avait aussi diminué de moitié. On voit donc comment on peut concevoir une quantité d'électricité qui soit la moitié, le tiers, etc., d'une quantité déterminée et, en général, comment deux quantités d'électricité sont entre elles dans un rapport $\frac{m}{n}$, ce rapport pouvant d'ailleurs être évalué au moyen des actions produites sur un même corps électrisé placé à la même distance.

Il en résulte que la quantité électrique est une grandeur mesurable, c'est-à-dire qu'on pourra la représenter par un nombre, à la condition de choisir une certaine quantité comme unité.

Densité électrique. — A la notion de la quantité se rat-

tache celle de la densité électrique. On sait que, dans le cas d'un corps conducteur électrisé, l'électricité se porte tout entière à la surface. Ce fait, vérifié par de nombreuses expériences, peut être déduit par le calcul, si l'on admet que, dans un corps conducteur, les masses électriques obéissent à la loi de Coulomb. D'autre part, le calcul montre que la répartition de l'électricité aux différents points de la surface extérieure du corps dépend de la forme de cette surface. On a donc été amené, pour définir l'électrisation de chaque point, à considérer la quantité d'électricité répartie sur chaque élément de la surface, rapportée à l'unité de surface. C'est ce qu'on nomme la *densité* au point considéré. On voit que, si l'on représente cette densité par σ, on a

$$\sigma = \frac{dq}{ds}.$$

Tension. — Dans tous les phénomènes électriques que nous avons à considérer, un corps conducteur est toujours plongé dans un milieu isolant, c'est-à-dire dans un diélectrique qui maintient l'électricité à la surface du corps. Il existe donc, à chaque point de la surface du conducteur, une force qui pousse la masse électrique vers l'extérieur. On démontre par le calcul que cette force est proportionnelle au carré de la densité et on lui a donné le nom de *pression électrostatique* ou de *tension électrique* (1).

Potentiel. — Les grandeurs électriques que nous connaissons déjà, quantité, densité, tension, ne suffiraient pas pour interpréter tous les phénomènes.

Prenons deux sphères de métal isolées et électrisées que nous supposerons assez éloignées l'une de l'autre pour qu'on

(1) L'expression de *tension* a souvent été employée dans des sens différents, ce qui a amené des confusions. On est d'accord maintenant pour lui donner uniquement le sens défini ci-dessus.

n'ait pas à tenir compte des phénomènes d'influence, et réunissons-les par un fil métallique de faible diamètre. Il peut se présenter deux cas : ou bien l'équilibre électrique ne sera pas troublé par la réunion des deux sphères et celles-ci conserveront leurs charges respectives, ou bien il s'établira un nouvel état d'équilibre et il y aura passage de l'électricité d'une des sphères sur l'autre, la quantité totale restant la même.

Dans le premier cas, on dit que les deux sphères sont au même *potentiel;* dans le second, on dit qu'elles ont des potentiels différents ou qu'il existe entre elles une différence de potentiel.

On voit que cette notion du potentiel se présente de la même manière que la pression dans les gaz. Étant donnés deux récipients fermés, renfermant un même gaz, mis en communication par un tube étroit, l'équilibre ne sera pas troublé si les deux masses gazeuses sont à la même pression. Si, au contraire, les pressions sont différentes, il y aura passage du gaz d'un des récipients dans l'autre, la masse totale restant la même.

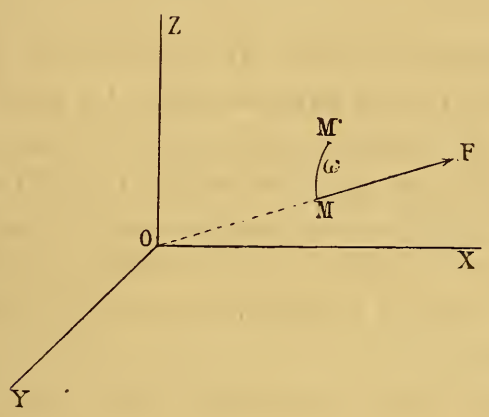
On pourrait encore considérer deux vases ouverts renfermant un liquide. Dans ce cas, l'écoulement du liquide d'un vase dans l'autre par le tube de communication sera dû à la différence des niveaux liquides. Enfin on trouve encore une analogie dans la théorie de la chaleur. Si l'on met en communication deux corps, il y aura transport de chaleur de l'un à l'autre par conductibilité, pourvu que leurs températures soient différentes, quelles que soient d'ailleurs les quantités de chaleur renfermées dans les deux corps.

Ces comparaisons, auxquelles il ne faut pas du reste attacher une importance exagérée, permettent de se faire une idée plus ou moins claire de ce qu'on entend par le potentiel électrique. Mais, pour l'utiliser et pouvoir lui appliquer le calcul, il est nécessaire de le mesurer et par conséquent de le préciser en en donnant une définition mathématique.

L'idée de potentiel n'est pas nouvelle et c'est en 1828 que Green l'appliqua pour la première fois à l'électricité. Ce n'est du reste qu'un cas particulier d'une théorie plus générale de la Mécanique rationnelle.

Considérons trois axes rectangulaires (*fig.* 1) et supposons qu'un point matériel M de masse m se déplace d'une manière quelconque dans l'espace, avec cette condition d'être soumis continuellement à l'action d'une force F variable avec la position du point, et dont la direction passe constamment par l'origine.

Fig. 1.



Désignons par r la distance OM, il est facile de voir que, quelle que soit la trajectoire du point M, le travail élémentaire effectué par la force F est égal à $F\,dr$. En effet, soit $MM' = ds$, et soit ω l'angle de F avec MM'. La composante de F suivant MM' est $F\cos\omega$. Donc le travail élémentaire est

$$F\cos\omega\, ds = F\, dr,$$

en remarquant que $ds\cos\omega = dr$.

Ceci posé, si x, y, z sont les coordonnées du point M et X, Y, Z les composantes de la force suivant les trois axes, le travail élémentaire peut aussi être représenté par la somme des travaux élémentaires des composantes et l'on a

$$F\, dr = X\, dx + Y\, dy + Z\, dz.$$

Admettons que le deuxième membre soit la différentielle exacte d'une certaine fonction de x, y, z, de sorte que

$$\int (X\,dx + Y\,dy + Z\,dz) = f(x, y, z).$$

Supposons que sous l'action de la force variable le point matériel soit entraîné de M_1 en M_0. Le travail effectué s'obtiendra en prenant l'intégrale ci-dessus entre les limites correspondant aux points M_1 et M_0. Ce sera [1]

$$f(x_0, y_0, z_0) - f(x_1, y_1, z_1).$$

Mais, si l'on voulait ramener le point de M_0 en M_1, il faudrait vaincre la résistance opposée par la force F et dépenser la même quantité de travail qui pourra d'ailleurs être restituée, lorsqu'on laissera de nouveau revenir le point matériel en M_0 sous l'action de F; c'est-à-dire qu'on se trouve dans le cas d'un ressort que l'on écarte de sa position d'équilibre. On est obligé, pour le déformer, de dépenser un certain travail et ce travail n'est restitué que lorsqu'on laisse le ressort revenir à sa position initiale. C'est encore ce qui se produit pour un corps pesant qu'on élève d'une certaine hauteur.

On voit que l'on peut considérer l'énergie du ressort comme étant pour ainsi dire à l'état latent. Elle reste emmagasinée dans le corps, jusqu'au moment où l'on abandonne celui-ci à lui-même. C'est à cette forme d'énergie qu'on a donné le nom d'énergie *potentielle*.

Si nous revenons au cas que nous avons considéré d'abord d'un milieu tel qu'en chacun de ses points une masse m soit soumise à une force fonction de la position du point, on voit que chaque point pourra être caractérisé par une certaine valeur de l'énergie potentielle qu'y posséderait la masse m

---

[1] Il est évident, d'ailleurs, que ce travail doit être indépendant de la trajectoire suivie par m pour aller de M_1 en M_0, sinon on pourrait, en ramenant la masse m à son point de départ et choisissant convenablement les chemins parcourus, obtenir une production de travail sans dépense équivalente, ce qui conduirait au mouvement perpétuel.

par rapport à un certain point M_0 pris comme point de comparaison. Désignons cette valeur par V; cette énergie sera exprimée par le travail que pourra produire la masse m en se déplaçant du point M au point M_0, sous l'action de la force F ou, ce qui revient au même, par le travail qu'il faudra dépenser pour amener la masse m du point M_0 au point M, malgré la résistance opposée par F.

Nous pourrons d'ailleurs supposer, pour simplifier, qu'au point M_0 l'énergie potentielle est nulle, exactement comme pour déterminer en topographie l'altitude d'un point, nous choisissons un plan de comparaison arbitraire auquel nous donnons la cote o.

On aura alors

$$V = -f(x, y, z).$$

C'est cette fonction V qui a été désignée sous le nom de *fonction potentielle*. Elle a été ensuite désignée par abréviation sous le nom de *potentiel*, et c'est cette dernière dénomination qui a prévalu.

Avant d'appliquer cette théorie à l'étude de l'électricité, il importe de faire connaître quelques-unes des propriétés de la fonction V.

Considérons l'équation $V = C$, dans laquelle C est une quantité constante à laquelle on pourra successivement donner différentes valeurs. Chacune de ces équations représente une surface qui est le lieu des points ayant même potentiel. Ces surfaces sont nommées surfaces *équipotentielles* ou quelquefois *surfaces de niveau*. Cette dernière dénomination vient du cas où l'on applique la théorie à l'équilibre des liquides.

On peut démontrer facilement qu'en chaque point la direction de la force F est normale à la surface de niveau qui passe par ce point.

En effet, l'équation différentielle des surfaces de niveau est

$$X\,dx + Y\,dy + Z\,dz = 0.$$

Prenons un point quelconque (x, y, z) et soient α, β,

les angles que fait avec les axes la force F en ce point. On a pour ses composantes

$$X = F\cos\alpha, \quad Y = F\cos\beta, \quad Z = F\cos\gamma.$$

Prenons sur la surface de niveau qui passe par le point considéré un point voisin $(x + dx, y + dy, z + dz)$; soient ds l'élément qui joint les deux points et α', β', γ' les angles de ds avec les axes; on a

$$dx = ds\cos\alpha', \quad dy = ds\cos\beta', \quad dz = ds\cos\gamma';$$

substituant dans l'équation de la surface, il vient

$$\cos\alpha\cos\alpha' + \cos\beta\cos\beta' + \cos\gamma\cos\gamma' = 0,$$

c'est-à-dire que F est perpendiculaire à ds et, comme d'ailleurs cet élément est quelconque, il en résulte que F est normale à la surface.

Parmi toutes les trajectoires suivant lesquelles peut se déplacer la masse m, on peut considérer des courbes qui soient en chaque point tangentes à la direction de la force. Ces courbes, qui coupent alors orthogonalement les surfaces de niveau, ont reçu le nom de *lignes de force*.

On voit donc que, connaissant la fonction V, on peut trouver la direction de la force en chaque point. On peut aussi obtenir son intensité.

En effet, on a

$$-dV = X\,dx + Y\,dy + Z\,dz.$$

Dans cette relation dV est une différentielle totale; donc

$$dV = \frac{dV}{dx}dx + \frac{dV}{dy}dy + \frac{dV}{dz}dz,$$

les coefficients de dx, dy, dz représentant alors des dérivées partielles.

Si l'on identifie les deux relations ci-dessus, on a

$$X = -\frac{dV}{dx}, \quad Y = -\frac{dV}{dy}, \quad Z = -\frac{dV}{dz}.$$

Les axes choisis étant d'ailleurs quelconques, on peut dire que la composante S de la force dans une direction quelconque suivant laquelle on compterait une variable s sera égale à la dérivée partielle du potentiel par rapport à cette variable, changée de signe

$$S = -\frac{dV}{ds}.$$

Si, en particulier, on prend la dérivée par rapport à la normale à la surface de niveau, on aura la force elle-même

$$F = -\frac{dV}{dn}.$$

Appliquons maintenant les considérations qui précèdent aux phénomènes électriques. Supposons qu'en un point O se trouve une certaine quantité Q d'électricité positive, par exemple. Le milieu ambiant est constitué par un diélectrique; il est clair que, si en un point quelconque M de ce milieu, tel que $OM = r$, se trouve une masse électrique Q', il y aura en même temps entre O et M une force dont la loi de Coulomb donnera l'intensité

$$F = k\frac{QQ'}{r^2}.$$

Nous pourrons toujours supposer, d'une part, que l'unité de quantité d'électricité positive ait été choisie de manière que le coefficient k soit égal à 1, et, d'autre part, que Q' soit égal à cette unité, de sorte que la force se réduira à

$$F = \frac{Q}{r^2}.$$

Nous savons que le potentiel au point M est donné par l'équation

$$-dV = F\,dr,$$

d'où

$$V = -\int \frac{Q}{r^2}\,dr = \frac{Q}{r} + \text{const.}$$

D'après la remarque que nous avons faite plus haut, on

sait que la constante peut être considérée comme nulle, à la condition de compter, pour chaque point, le potentiel par rapport à un point déterminé dont on prendra le potentiel comme point de départ et comme représentant le potentiel o.

On est convenu de donner à la terre le potentiel o [1]; de sorte que, d'après ce qui précède, nous aurons pour le potentiel du point M la valeur

$$V = \frac{Q}{r},$$

cette valeur représentant alors le travail que serait susceptible de développer une quantité égale à l'unité d'électricité positive pour aller du point M à la terre, en obéissant aux forces électriques ou, inversement, le travail qu'il faudrait dépenser pour amener la même masse électrique de la terre au point M.

Nous avons supposé jusqu'à présent que l'espace occupé par le diélectrique, espace qui constitue ce qu'on appelle le *champ électrique,* reçoit l'action d'une seule masse électrique Q, concentrée au point O. Si, au lieu d'une masse, on en a plusieurs Q, Q′, Q″, ..., il est clair que le travail à effectuer, pour transporter la masse d'électricité positive égale à l'unité, de la terre en un point M, sera égal à la somme algébrique des potentiels correspondant à chacune des masses Q, Q′, Q″, ..., supposée seule, de sorte qu'on

---

[1] Lorsqu'on raisonne sur le champ électrique considéré dans toute son étendue, c'est-à-dire jusqu'à l'infini, on admet quelquefois que c'est à l'infini que se trouve le potentiel o. Dans la pratique, le potentiel de la terre ne variant pas d'une manière appréciable avec les charges qui peuvent lui être communiquées, il est plus commode de prendre ce dernier comme terme de comparaison, sans admettre d'ailleurs pour cela qu'il est égal au potentiel de l'infini. En somme, le potentiel étant déduit de la loi de Coulomb sous la forme d'une intégrale, on ne peut pas déterminer la véritable valeur de la constante et l'on ne peut en réalité évaluer que des différences de potentiel.

pourra, dans ce cas, prendre pour le potentiel du point M

$$V = \frac{Q}{r} + \frac{Q'}{r'} + \frac{Q''}{r''} + \ldots = \sum \frac{Q}{r}.$$

Il est facile maintenant de voir que cette définition mathématique du potentiel comprend celle que nous avons donnée en commençant et que, si deux masses électriques étant en M et M′, ces deux points sont à des potentiels différents, l'électricité tendra à passer du potentiel le plus élevé au potentiel le moins élevé. Si, en particulier, on réunit les deux corps par un fil conducteur, le passage se fera dans un temps très court et la quantité qui passera sera telle que, par suite de la nouvelle distribution, les potentiels des points M et M′ soient égaux.

Nous avons admis que les masses électriques considérées étaient réduites à un point. Dans la réalité, nous ne pouvons avoir affaire qu'à des corps conducteurs de dimensions finies qui remplacent un volume du champ électrique égal au leur, et qui servent, pour ainsi dire, de support à l'électricité.

Remarquons cependant que, s'il s'agit des actions exercées sur un point extérieur par une sphère conductrice électrisée, ces actions sont rigoureusement les mêmes que si toute la charge était concentrée au centre de la sphère. On sait, en effet, que ce théorème a été démontré par Newton, pour le cas d'une couche sphérique homogène obéissant à la loi de l'attraction universelle, condition à laquelle satisfait la couche électrique répandue à la surface d'une sphère conductrice. Au contraire, lorsque le point est à l'intérieur de la sphère, l'action est nulle.

Mais, s'il s'agit de conducteurs de forme quelconque, la distribution électrique n'est plus uniforme et dépend de la forme extérieure du corps. Dans ce cas, il résulte de ce qui précède qu'une fois l'équilibre établi, le potentiel est constant pour tous les points du corps. En effet, puisqu'il y a équilibre, la force entre deux points quelconques du conduc-

teur est nulle. Cette force étant la dérivée du potentiel, il en résulte que celui-ci est constant.

Ici encore il y a analogie complète entre le potentiel électrique et la pression dans une masse gazeuse.

Quel que soit le nombre des masses agissantes, nous pouvons toujours considérer dans le diélectrique qui constitue le champ électrique des surfaces équipotentielles ou surfaces de niveau et des lignes de force. Si, en particulier, nous considérons la surface de séparation du diélectrique avec un corps conducteur, cette surface est une surface de niveau, puisque tous les points d'un corps conducteur sont au même potentiel.

Dans le cas de l'électricité, on voit immédiatement que la force est normale aux surfaces de niveau ; car, pour déplacer une masse électrique entre deux points de cette surface, qui ont même potentiel, le travail doit être nul.

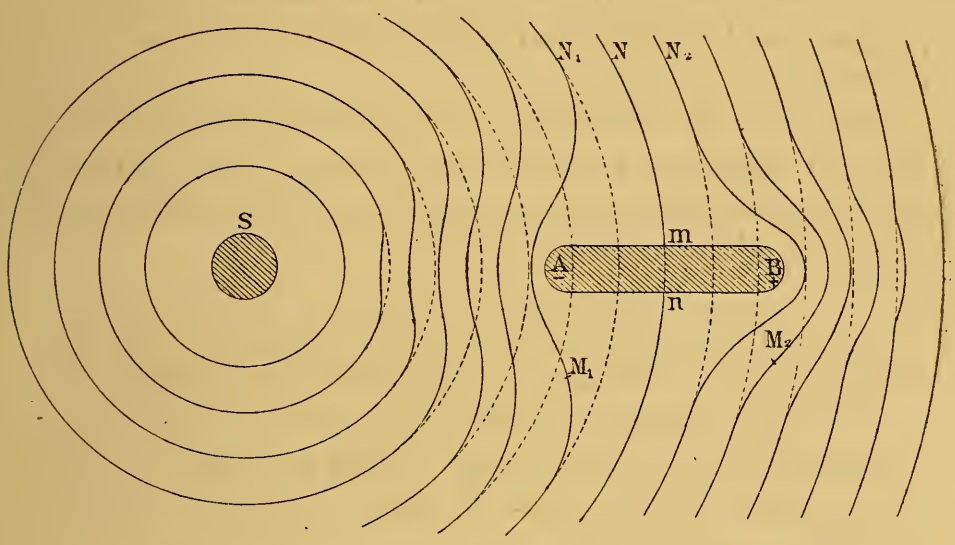
Phénomènes d'influence. — Nous venons de voir que deux points d'un conducteur en équilibre sont au même potentiel. Cela a lieu quand même les quantités d'électricité qui se trouvent en ces deux points ne sont pas égales ; il peut même arriver qu'elles soient de signes contraires. Nous en avons un exemple dans les phénomènes d'électrisation par influence.

On sait en quoi consistent ces phénomènes. Considérons un corps conducteur électrisé qui sera par exemple une sphère S isolée et chargée d'électricité positive (*fig.* 2). Si l'on place, dans son voisinage, un condueteur isolé AB, l'expérience montre qu'il se produit de l'électricité négative en A et de l'électricité positive en B. Dans le cas où le conducteur AB est relié au sol, il est chargé tout entier d'électricité négative.

La considération des surfaces de niveau permet de comprendre qu'il en doit être ainsi. En effet, la sphère S, étant d'abord seule, produit un champ électrique qui a pour surfaces de niveau des sphères concentriques à S dont les po-

tentiels vont en décroissant à mesure que leur rayon augmente. Plaçons le conducteur isolé AB; la surface de ce conducteur devant être une surface de niveau, le champ électrique va se trouver modifié et, parmi toutes les surfaces du champ primitif rencontrées par AB, il y en aura une, telle que N, dont la forme ne sera pas changée et dans laquelle la portion *mn* sera remplacée par la surface entière de AB. Mais, si

Fig. 2.



nous considérons les surfaces ayant un rayon plus grand que N, leur potentiel étant inférieur à celui de NAB, ces surfaces vont être forcées de s'infléchir de manière à envelopper l'extrémité B sans la toucher. Il en résulte que le potentiel d'un point tel que M_2 va se trouver sur une surface correspondant à un potentiel plus élevé que lorsque la sphère S était seule. Ce résultat ne peut être obtenu que par un développement en B d'une certaine quantité d'électricité positive.

On verra de même que les surfaces correspondant à un potentiel plus élevé que celui de N doivent s'infléchir pour venir passer entre A et S, ce qui correspond à une diminu-

tion du potentiel d'un point tel que M_1 et par suite à une production d'électricité négative en A.

Le résultat final est donc que les extrémités A et B, tout en étant au même potentiel, sont chargées d'électricités de noms contraires.

Dans le cas particulier où AB est en communication avec le sol, son potentiel est o, toutes les surfaces de niveau doivent passer entre A et S et AB doit être chargé d'électricité négative.

Capacité. — Il résulte de ce que nous venons de voir que la charge d'un conducteur ne permet pas en général de rien préjuger sur la valeur de son potentiel, et inversement, connaissant le potentiel d'un conducteur, on ne peut rien en déduire relativement à sa charge ou à la distribution électrique.

Pour nous en rendre compte, considérons une sphère conductrice isolée de rayon r possédant une charge Q. Le théorème de Newton nous apprend que nous pouvons considérer cette charge comme concentrée au centre de la sphère. Le potentiel de la sphère est égal au potentiel d'un point pris sur sa surface, c'est-à-dire situé à une distance r du centre ; il est donc

$$V = \frac{Q}{r}.$$

Si l'on considère la même sphère, en faisant varier sa charge, on voit que le potentiel varie comme elle ; mais, si l'on prend une autre sphère de rayon r', la charge Q produira un potentiel égal à $\frac{Q}{r'}$ et, pour retrouver le potentiel V, il faudra une charge Q′, telle que

$$\frac{Q'}{r'} = \frac{Q}{r},$$

c'est-à-dire qu'à potentiel égal les charges sont proportionnelles aux rayons des sphères.

D'une façon générale, il faudra des charges différentes pour donner le même potentiel à des conducteurs différents. On est convenu de dire dans ce cas que ces conducteurs n'ont pas la même *capacité électrique* et, pour définir cette nouvelle grandeur, on est convenu d'appeler *capacité d'un conducteur* la charge nécessaire pour lui en donner un potentiel égal à l'unité de potentiel. Si donc on admet que pour un conducteur quelconque le potentiel est proportionnel à la charge, on a, en désignant par C la capacité, par Q la charge et par V le potentiel,

$$\frac{C}{Q} = \frac{1}{V},$$

d'où

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Dans le cas particulier où le conducteur est une sphère, on a

$$V = \frac{Q}{r},$$

d'où

$$C = r,$$

c'est-à-dire que la capacité d'une sphère est représentée par le même nombre que son rayon.

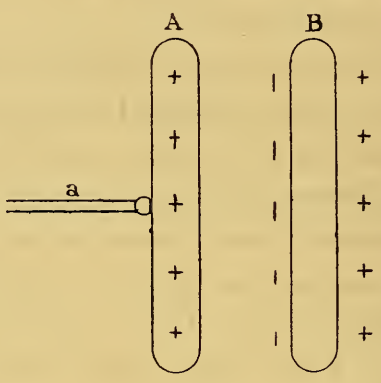
Condensation. — La considération des capacités électriques présente de l'importance au point de vue de la théorie des condensateurs qui est elle-même une conséquence des phénomènes d'influence.

Considérons un conducteur isolé A (*fig.* 3) qui, au moyen d'un conducteur mobile a, peut être mis en communication avec une source d'électricité, c'est-à-dire avec un appareil pouvant à chaque instant réparer ses pertes et se maintenir à un potentiel constant V. Le conducteur A va prendre une certaine charge Q et son potentiel V sera le même que celui de la source.

Supprimons maintenant la communication a et approchons

de A un conducteur B que nous supposerons d'abord isolé. On sait que, si l'électricité de A est positive, il se produit de l'électricité négative sur la face de B qui regarde A, tandis que la face opposée se chargera d'électricité positive. On sait d'ailleurs que les quantités des deux électricités placées sur B sont égales; car, si l'on supprime le corps influençant A ou si on le décharge en le mettant à la terre, l'expérience montre que le corps B revient à l'état neutre.

Fig. 3.



Il en résulte que la présence de B aura pour effet de diminuer le potentiel sur A. En effet, ce potentiel représente le travail qu'il faut développer pour amener une unité d'électricité positive de la terre sur A. Or on voit que ce travail sera diminué par la présence de l'électricité négative de B. A la vérité l'électricité positive de B agira en sens contraire; mais, comme elle est plus éloignée de A, son action sera plus faible, de sorte que finalement la présence de B diminuera le travail à dépenser pour amener une unité d'électricité positive sur A; donc le potentiel de A sera inférieur à V.

Mais, si l'on rétablit alors la communication *a* avec la source, il pourra passer sur A une nouvelle quantité d'électricité, jusqu'à ce que son potentiel ait repris la valeur V.

On voit donc qu'en réalité la présence de B a augmenté la capacité de A. Il est facile de voir en outre que cette augmen-

tation de capacité sera beaucoup plus considérable si, au lieu d'isoler B, on le met en communication avec le sol, car alors ce conducteur B ne renfermera plus que de l'électricité négative.

L'ensemble des deux corps A et B, qui seront par exemple deux plateaux parallèles, constitue un *condensateur*. On appelle *capacité du condensateur* la capacité que prend le plateau A nommé *collecteur,* lorsque le plateau B appelé *condenseur* est relié au sol. Le rapport de cette capacité à la capacité du plateau A considéré seul se nomme la *force condensante* du condensateur.

Il est facile de voir que cette quantité caractéristique d'un condensateur, sa capacité, dépend uniquement de la forme de ses deux armatures et de leurs positions relatives. Elle pourra donc être déterminée par le calcul.

Nous en donnerons comme exemple un cas simple où le collecteur est formé par une sphère A (*fig.* 4) et le condenseur par une sphère creuse B concentrique à la première. Soit q la charge de A que nous supposerons positive. Admettons d'abord que B est isolé ; il y aura alors une charge $-q_1$ d'électricité négative sur la surface interne de B et une charge $+q_1$ d'électricité positive sur la surface externe. Il est facile de voir que les charges q et q_1 sont égales. Ce théorème, démontré et vérifié expérimentalement par Faraday, résulte du théorème de Newton.

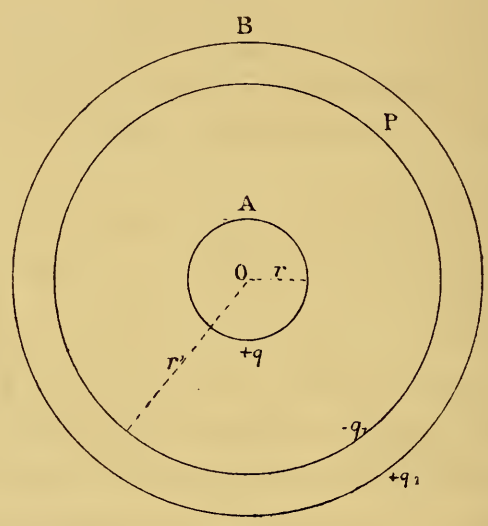
On sait en effet que, d'après ce théorème, l'action d'une couche sphérique homogène qui obéit à la loi de l'attraction universelle est nulle sur un point intérieur, tandis que pour un point extérieur elle est la même que si toute la masse était concentrée au centre. On peut remarquer d'abord qu'il y a symétrie autour du centre ; de plus, lorsque l'équilibre sera établi, il faudra que la résultante des actions exercées sur un point P situé à l'intérieur de B soit nulle.

Cette résultante est égale à la somme des actions de $+q$, de $-q_1$ et de $+q_1$. L'action de la couche $+q_1$ extérieure

au point P est nulle; les actions de $+q$ et $-q_1$ sont les mêmes que si les charges étaient concentrées au centre. Les deux quantités d'électricité $+q$ et $-q_1$ peuvent donc être considérées comme agissant à des distances égales du point P; par suite, pour que la résultante soit nulle, il faut que $q = q_1$.

Le même raisonnement s'appliquera évidemment à la couche d'électricité négative qui est à l'intérieur de B lorsque le condenseur est relié au sol, de sorte que nous voyons déjà que, dans un condensateur, les charges sont égales et de signes contraires.

Fig. 4.



Ceci posé, si le collecteur était seul, sa charge étant q et son rayon r, son potentiel serait

$$V = \frac{q}{r},$$

et sa capacité

$$C = r.$$

Pour trouver le nouveau potentiel V′ de A en présence de B, cherchons en particulier le potentiel du centre. On aura pour ce point

$$V' = \sum \frac{q}{r} = \frac{q}{r} - \frac{q}{r'} = \frac{q(r'-r)}{rr'}.$$

Donc la nouvelle capacité de A, c'est-à-dire la capacité du condensateur, sera

$$C = \frac{q}{V'} = \frac{rr'}{r' - r}.$$

On augmentera donc cette capacité en augmentant les rayons r et r', c'est-à-dire les surfaces électrisées, et en diminuant l'épaisseur $r' - r$ de la couche d'air qui les sépare.

Les calculs de Gauss montrent que ces conclusions sont vraies, quelle que soit la forme du condensateur, pourvu que le condenseur enveloppe complètement le collecteur.

Il faut remarquer ici que dans la découverte des phénomènes de condensation, qui eut, comme on sait, pour origine l'expérience de Cunéus sur l'eau, on arriva presque du premier coup à la forme adoptée encore aujourd'hui pour un grand nombre de condensateurs, celle de la bouteille de Leyde.

Dans ces condensateurs, qui se rapprochent de la forme théorique que nous avons étudiée, nous trouvons en effet les deux armatures concentriques; mais, au lieu d'être séparées par de l'air, comme nous l'avons supposé jusqu'à présent, elles sont séparées par le verre de la bouteille.

On fut alors conduit à chercher l'influence que pouvait avoir sur les qualités d'un condensateur la nature du diélectrique qui sépare ses armatures. Ces recherches furent entreprises par Faraday; il avait le premier rejeté l'idée des actions à distance et, admettant au contraire que les actions électriques résultent de modifications du diélectrique interposé, il en concluait naturellement que les effets pouvaient être changés, au moins comme intensité, lorsqu'on changeait la nature du diélectrique.

L'expérience lui montra en effet que, toutes choses égales d'ailleurs, la capacité d'un condensateur n'est pas la même lorsqu'on fait varier le diélectrique et que cette capacité, sensiblement constante lorsque le diélectrique est un gaz, dont on peut même faire varier la pression, devient plus grande

lorsque le gaz est remplacé par un diélectrique solide, tel que le verre, la résine, le soufre, etc.

Chaque corps isolant peut donc être caractérisé par un coefficient représentant le rapport de la capacité d'un condensateur ayant pour diélectrique le corps considéré, à la capacité du même condensateur dans lequel le diélectrique serait remplacé par une lame d'air de même épaisseur. C'est ce coefficient que Faraday a désigné sous le nom de *pouvoir inducteur spécifique*.

Il y a avantage à employer les diélectriques solides pour les condensateurs, d'abord parce qu'ils ont un pouvoir inducteur spécifique plus grand que l'air, et aussi parce que, présentant une plus grande résistance au passage de l'électricité, on peut employer des lames plus minces, sans qu'il jaillisse d'étincelle d'une armature à l'autre, à travers le diélectrique.

Travail disponible dans les corps électrisés. — Il résulte de la définition même du potentiel que si l'on met un corps électrisé en communication avec le sol, au moyen d'un conducteur, le potentiel V du corps devient égal à o et, suivant l'expression habituelle, l'électricité du corps *s'écoule* dans le sol. Cette chute de potentiel correspond à un certain travail disponible qu'il est facile d'évaluer.

Remarquons d'abord que, si le potentiel restait constant et égal à V, le travail effectué par la quantité d'électricité Q allant du corps au sol serait représenté par le produit VQ. Mais il n'en est pas ainsi ; à mesure que l'électricité s'écoule, le potentiel baisse, de sorte que, si l'on suppose que cet écoulement se fasse unité par unité, le travail correspondant à chaque unité va en décroissant jusqu'à o.

Le travail total, qui est d'ailleurs le même que celui qui est nécessaire pour charger le corps de la quantité Q en le portant au potentiel V, sera donc représenté par une intégrale prise entre les limites o et Q.

Supposons que, la charge étant Q, on l'augmente de dQ, le travail nécessaire pour cela sera $V\,dQ$; donc, si W représente le travail disponible, on aura

$$dW = V\,dQ.$$

Or, C étant la capacité du corps, $V = \frac{Q}{C}$; donc

$$dW = \frac{Q\,dQ}{C},$$

et, d'après ce que nous venons de dire, le travail total sera

$$W = \int_0^Q \frac{Q\,dQ}{C} = \frac{1}{C}\int_0^Q Q\,dQ = \frac{Q^2}{2C} = \frac{VQ}{2} = \frac{CV^2}{2}.$$

Le travail disponible dans un conducteur est donc égal à la moitié du produit VQ. On pouvait d'ailleurs le prévoir en remarquant que ce travail serait le même si le potentiel conservait une valeur constante et égale à sa valeur moyenne $\frac{V}{2}$. C'est ainsi que le travail nécessaire pour remplir un vase cylindrique de hauteur h avec un liquide est égal au poids total du liquide multiplié par la hauteur moyenne $\frac{h}{2}$.

On voit, en outre, qu'à charge égale, le travail disponible est plus grand dans un conducteur seul que si celui-ci fait partie d'un condensateur; mais, d'autre part, à potentiel égal, l'énergie disponible augmente avec la capacité, ce qui explique les effets mécaniques que l'on peut produire avec les condensateurs et aussi la puissance de ces effets, lorsqu'ils sont produits par la foudre, le travail croissant comme le carré du potentiel.

Il est facile, d'après ce qui précède, de calculer l'énergie disponible dans un condensateur dont on connaît la charge et la capacité. On sait que, pour former des condensateurs puissants, avec des bouteilles de Leyde dont les dimensions sont nécessairement limitées, on associe les bouteilles de manière à former des batteries.

Considérons n bouteilles que, pour simplifier, nous supposerons identiques; soit c la capacité de l'une d'elles, chargeons-les séparément en reliant leur armature intérieure à une source au potentiel V_0 qui leur communiquera une charge $q = V_0 c$.

Si l'on réunit toutes les armatures intérieures, l'équilibre ne sera pas troublé, puisqu'elles sont toutes au même potentiel, et la charge totale sera évidemment

$$Q = nq,$$

le potentiel restant V_0.

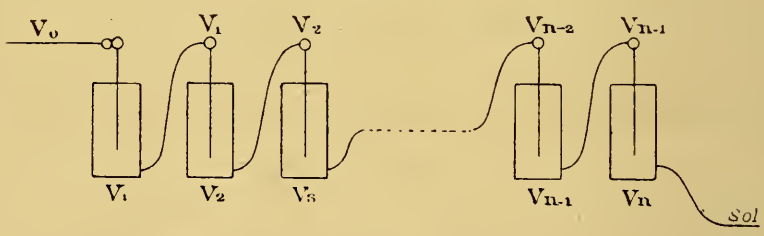
La capacité de la batterie sera donc

$$C = \frac{Q}{V_0} = nc.$$

Ce serait la même que celle d'une bouteille unique de surface n fois plus grande; on dit alors que les bouteilles sont associées en *surface*.

On peut encore associer les bouteilles en *cascade* (*fig.* 5);

Fig. 5.



dans ce cas, elles sont isolées; l'armature intérieure de la première étant reliée à la source, son armature extérieure communique avec l'armature intérieure de la seconde, dont l'armature extérieure est reliée à l'armature intérieure de la troisième, et ainsi de suite, l'armature extérieure de la dernière étant reliée au sol.

Soit V_0 le potentiel de la source, ce sera celui de l'armature intérieure de la première bouteille; soit Q sa charge. Il résulte de ce que nous avons dit à propos des phénomènes

d'influence, que le conducteur isolé formé par l'extérieur de la première bouteille et l'intérieur de la seconde prendra un potentiel V_1 inférieur à V_0 et de plus, en considérant les bouteilles comme des condensateurs fermés, la charge extérieure de la première bouteille sera $-Q$, tandis que la charge intérieure de la seconde sera $+Q$, et ainsi de suite. On a alors

$$V_0 - V_1 = \frac{Q}{c},$$

$$V_1 - V_2 = \frac{Q}{c},$$

$$\ldots\ldots\ldots\ldots,$$

$$V_{n-1} - V_n = \frac{Q}{c};$$

ajoutant et remarquant que $V_n = 0$, puisque la dernière armature est au sol, on a

$$V_0 = n\frac{Q}{c}.$$

Le travail disponible est donc

$$W = \frac{V_0 Q}{2} = \frac{1}{n}\frac{V_0^2 c}{2}.$$

Avec la disposition précédente, le travail disponible était

$$W' = \frac{V_0 Q}{2} = n\frac{V_0^2 c}{2}.$$

On voit que, si l'on dispose d'une source pouvant produire un potentiel donné V_0, et d'une batterie de n bouteilles, on pourra produire un travail plus grand avec la première disposition qu'avec la seconde. Il semble, par suite, que la disposition en cascade soit toujours nuisible; il y a cependant des cas où elle est avantageuse. Remarquons qu'avec la disposition en surface la différence de potentiel entre les deux armatures d'une même bouteille est V_0, tandis que, si les batteries sont disposées en cascade, cette différence est $\frac{V_0}{n}$. Or, si le potentiel V_0 de la source est très élevé, il peut arriver

que, les bouteilles étant associées en surface, le verre de celles-ci soit percé. On sera alors forcé d'avoir recours à la disposition en cascade, pour pouvoir utiliser la batterie.

Courant électrique. — Lorsqu'on établit une communication, par exemple au moyen d'un fil métallique, entre deux corps électrisés à des potentiels différents V et V′, l'électricité passe du potentiel le plus élevé au potentiel le plus faible. Si le fil de communication n'est pas très long, la durée du phénomène est très petite; elle n'est cependant pas nulle, et, pendant ce temps, on dit que le fil est parcouru par un *courant électrique.*

Mais, si, par un procédé quelconque, on maintient constants les potentiels V et V′ des deux conducteurs, il s'établit un régime permanent et l'on a alors dans le fil un courant constant, que l'on peut se représenter comme un flux continu d'électricité s'écoulant du potentiel le plus élevé au potentiel le plus faible.

C'est vers 1825 que Ohm chercha à établir les lois des courants électriques, en assimilant la propagation de l'électricité dans les corps conducteurs à la propagation de la chaleur, qui avait été étudiée par Fourier, quelques années auparavant.

Suivant l'idée de Ohm, de même que le flux de chaleur entre deux corps est produit par la différence de leurs températures, de même aussi le flux électrique doit être produit par deux états électriques différents, qu'il définit assez vaguement du reste, en employant le mot de *tension*. La théorie de Ohm fut plus tard reprise par Kirchhoff, qui la précisa et l'assimila d'une façon complète à la théorie de Fourier, en remplaçant la tension de Ohm par le potentiel électrique.

On sait que, d'après les hypothèses de Fourier, si l'on considère, dans un milieu conducteur de la chaleur, deux surfaces isothermes infiniment voisines et correspondant aux températures θ et $\theta + d\theta$, le flux ou la quantité de chaleur dQ,

qui traverse pendant l'unité de temps un élément ds de la première surface, est normal à l'élément, proportionnel à la différence de température $d\theta$ et en raison inverse de la distance dn des deux surfaces. On a donc

$$dQ = -h\,ds\,\frac{d\theta}{dn},$$

h représente le coefficient de conductibilité calorifique du milieu et le signe — indique que la chaleur progresse dans le sens des températures décroissantes.

Si l'on applique cette formule à l'électricité, les surfaces isothermes sont remplacées par les surfaces de niveau, $d\theta$ représente la différence dV des potentiels de deux surfaces voisines et dQ est la quantité d'électricité qui passe par unité de temps dans un élément ds de la surface de niveau. On a donc

$$dQ = -h\,ds\,\frac{dV}{dn}.$$

Ici le coefficient h, qui dépend de la nature du conducteur, est appelé coefficient de conductibilité électrique.

Loi de Ohm. — Prenons un conducteur formé par un fil cylindrique homogène et supposons-le placé dans un milieu parfaitement isolant. On peut admettre que les surfaces de niveau sont des plans perpendiculaires à l'axe du cylindre; considérons une section de surface s, située à une distance x d'un plan fixe A normal au fil, pris pour origine (*fig.* 6). Le potentiel sur cette section est fonction seulement de x; on peut donc écrire

$$dQ = -h\,ds\,\frac{dV}{dx},$$

et, si i est la quantité d'électricité qui traverse la section s tout entière pendant l'unité de temps, on aura

$$i = -hs\,\frac{dV}{dx}.$$

Le régime permanent étant établi, il passe, pendant le même temps, la même quantité d'électricité dans chaque section du fil, de sorte que la valeur de i est partout la même; c'est cette valeur constante que l'on nomme l'*intensité du courant*.

La valeur de i étant constante est par suite indépendante de x et l'on a

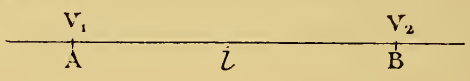
$$\frac{dV}{dx} = a;$$

d'où

$$V = ax + b,$$

a et b étant deux constantes à déterminer.

Fig. 6.



Soient V_1 le potentiel en A et V_2 le potentiel en un point B, situé à une distance l; on a, pour $x = 0$,

$$V_1 = b$$

et, pour $x = l$,

$$V_2 = al + b = al + V_1;$$

d'où

$$a = -\frac{V_1 - V_2}{l}.$$

Remplaçant a et b par leurs valeurs, il vient

$$(1) \qquad V = -\frac{V_1 - V_2}{l}x + V_1.$$

Quant à la valeur de i, elle sera

$$i = -hsa = hs\frac{V_1 - V_2}{l} = \frac{V_1 - V_2}{\frac{l}{hs}}.$$

On est convenu de désigner sous le nom de *force électromotrice* la cause qui produit entre deux points une différence de potentiel, quelle que soit d'ailleurs cette cause, et l'on

prend, pour la mesurer, cette différence elle-même, de sorte que, si E est la force électromotrice qui produit la différence de potentiel $V_1 - V_2$, on aura identiquement

$$E = V_1 - V_2,$$

et l'unité de force électromotrice sera la même que l'unité de potentiel.

Quant au dénominateur $\frac{l}{hs}$, on voit que c'est une grandeur qui a pour propriété, lorsqu'elle augmente, de diminuer l'intensité produite par une force électromotrice donnée; elle dépend d'ailleurs essentiellement du conducteur employé, on la nomme la *résistance* de ce conducteur. On voit qu'elle est proportionnelle à la longueur du fil, en raison inverse de sa section et de son coefficient de conductibilité.

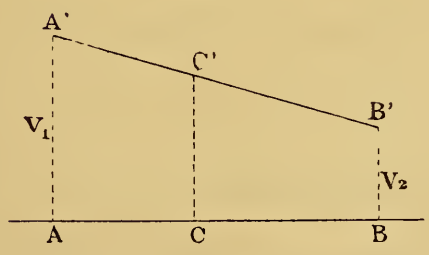
On a par suite, en désignant la résistance par R,

$$i = \frac{E}{R},$$

qui est l'expression habituelle de la loi de Ohm.

L'équation (1) montre que le potentiel décroît en progression arithmétique le long du fil, de sorte que, si l'on prend $AA' = V_1$, $BB' = V_2$ (*fig.* 7), la droite A'B' pourra servir à

Fig. 7.



déterminer les potentiels intermédiaires et CC' sera, par exemple, le potentiel en C.

Prenons maintenant un circuit formé de plusieurs conducteurs cylindriques, de sections et de natures différentes.

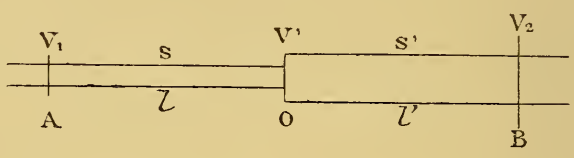
Les potentiels en A et B étant toujours V_1 et V_2, soit V' le

potentiel en O (*fig.* 8). Le régime permanent étant établi, l'intensité i est la même en tous les points; on aura donc, en considérant successivement les portions AO et OB,

$$i = \frac{V_1 - V'}{\frac{l}{cs}} = \frac{V' - V_2}{\frac{l'}{c's'}} = \frac{V_1 - V_2}{R + R'}.$$

Cette relation, qu'on peut évidemment étendre à un nombre quelconque de conducteurs cylindriques, montre que la résistance d'une série de conducteurs cylindriques est égale à la somme des résistances de chaque conducteur.

Fig. 8.



Enfin, s'il s'agit d'un conducteur quelconque, on peut toujours imaginer qu'il est remplacé par un conducteur cylindrique qui, pour la même différence de potentiel à ses extrémités, donnerait la même valeur pour l'intensité i. La résistance $\frac{l}{cs}$ de ce conducteur cylindrique représentera la résistance du conducteur considéré.

Courants dérivés. — Si les deux points A et B (*fig.* 9) sont réunis par un faisceau de conducteurs, tels que $a, b, d, \ldots$, le courant se partage entre eux. Désignons par I la quantité d'électricité qui passe en A dans l'unité de temps; ce serait l'intensité dans le circuit BMA, complété en dehors du faisceau de conducteurs. Si l'on désigne par i_1, i_2, i_3, ..., i_n les quantités d'électricité qui passent par unité de temps, dans une section de a, b, d, ..., on aura

$$(1) \qquad I = i_1 + i_2 + \ldots + i_n.$$

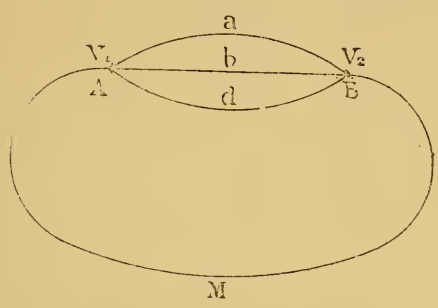
I est appelé *courant principal*, i_1, i_2, ... sont les intensités des *courants dérivés*.

V_1 et V_2 étant les potentiels de A et de B, nous pouvons écrire

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R},$$

R représentant alors la résistance de l'ensemble des conducteurs a, b, d, ... Il est facile d'ailleurs d'évaluer cette résistance en fonction des résistances de chaque conducteur me-

Fig. 9.



surées séparément. On aura, en effet, en appelant $r_1, r_2, \ldots, r_n$ ces résistances,

$$i_1 = \frac{V_1 - V_2}{r_1}, \quad i_2 = \frac{V_1 - V_2}{r_2}, \quad \ldots, \quad i_n = \frac{V_1 - V_2}{r_n};$$

d'où

$$i_1 r_1 = i_2 r_2 = \ldots = i_n r_n = IR$$

ou bien encore

$$\frac{i_1}{\frac{1}{r_1}} = \frac{i_2}{\frac{1}{r_2}} = \ldots = \frac{i_n}{\frac{1}{r_n}} = \frac{I}{\frac{1}{R}}.$$

D'après l'équation (1), I est égale à la somme des numérateurs; il en résulte que $\frac{1}{R}$ est la somme des dénominateurs, donc

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n},$$

d'où enfin

$$(2) \qquad R = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \ldots + \frac{1}{r_n}}.$$

Les lois exprimées par les relations (1) et (2) sont dues à Kirchhoff et portent son nom.

Travail fourni par le courant. — Lorsqu'un fil métallique est parcouru par un courant d'intensité I, le travail effectué le long du fil, pendant un temps donné, est égal au produit de la quantité d'électricité qui est passée pendant ce temps par la différence des potentiels aux extrémités du fil. Pendant l'unité de temps, cette quantité est égale à I et l'on a pour le travail correspondant

$$W = I(V_1 - V_2) = EI.$$

Si R est la résistance du fil entre les points dont les potentiels sont V_1 et V_2, on a

$$E = RI.$$

d'où

$$W = RI^2.$$

Lorsqu'il s'agit d'une substance inerte, c'est-à-dire d'un circuit ne renfermant pas de forces électromotrices, ce travail est employé tout entier à échauffer le fil et doit par conséquent se retrouver sous forme de chaleur.

Si W est évalué en kilogrammètres, on voit qu'en désignant par J l'équivalent mécanique de la chaleur, c'est-à-dire le nombre de kilogrammètres correspondant à une calorie, le courant électrique produira par unité de temps un nombre de calories égal à $\frac{RI^2}{J}$.

Cette loi porte le nom de *loi de Joule;* celui-ci avait trouvé par l'expérience que la quantité de chaleur produite dans un fil par le passage d'un courant était proportionnelle à la résistance du fil et au carré de l'intensité.

Les effets du courant ne se bornent pas toujours uniquement à un dégagement de chaleur; c'est ce qui arrive lorsque le circuit, au lieu d'une résistance inerte, renferme des corps susceptibles d'être décomposés ou bien encore des appareils capables de produire du travail sous une autre forme. Nous aurons occasion de revenir sur ces cas particuliers.

Magnétisme. — Les diverses grandeurs que nous venons de passer en revue pourraient suffire pour l'étude des phénomènes électriques proprement dits. Mais aux phénomènes électriques se rattachent une série de faits étudiés par Ampère : ce sont les actions réciproques entre les aimants et les courants qui constituent la branche importante de la science électrique désignée sous le nom d'*électromagnétisme*.

Nous sommes donc conduit, pour pouvoir appliquer le calcul à ces nouveaux faits, à définir d'une manière précise les propriétés des aimants, comme nous l'avons fait pour les corps électrisés ou pour les courants.

On sait en quoi consistent les propriétés générales des aimants; on trouve dans la nature un minerai de fer (oxyde magnétique ayant pour formule Fe^3O^4) qui jouit de la propriété d'attirer le fer. Cette propriété peut être communiquée d'une manière permanente à des barreaux d'acier, d'une manière temporaire à des barreaux de fer doux, qui deviennent à leur tour des aimants.

Bien que l'action soit beaucoup plus énergique pour le fer, celui-ci n'est pas le seul corps sur lequel agissent les aimants. En 1778, Brugmans découvre que le bismuth est repoussé; plus tard, Faraday étend cette propriété à un grand nombre d'autres corps et montre que les corps étudiés peuvent être classés en deux catégories : les uns, qu'il appelait corps *magnétiques,* étant attirés par l'aimant, comme le fer; les autres, qu'il nommait corps *diamagnétiques,* étant repoussés, comme le bismuth. Il est d'ailleurs probable que tous les corps, sans exception, pourraient être rangés dans l'une ou l'autre de ces classes, à la condition de prendre des aimants suffisamment puissants.

Toutefois, cette distinction est plus apparente que réelle, car on peut obtenir les deux effets sur le même corps à la condition de modifier le milieu dans lequel il est plongé. On est alors porté à croire que l'on n'observe que la différence des actions exercées par l'aimant sur les corps et sur le milieu environnant, de sorte qu'après avoir rangé tous les corps

dans un ordre déterminé, d'après ce que l'on pourrait appeler leur *pouvoir magnétique spécifique,* on pourrait, au moyen d'un aimant, produire sur un même corps des actions de sens contraires, en plongeant ce corps dans un milieu qui serait placé avant ou après lui sur la liste.

Actions magnétiques. — Nous voyons ici encore intervenir l'influence du milieu et, bien que la nature du magnétisme ne soit pas mieux connue que celle de l'électricité, on se trouve amené à rejeter les actions à distance, comme on l'a fait pour les phénomènes électriques; mais, comme pour les actions électriques aussi, il n'en est pas moins utile de connaître les lois qui régissent ces actions apparentes et d'avoir des formules qui, tout en ne rendant pas compte du mécanisme intime des phénomènes, permettent, du moins, d'appliquer le calcul aux résultats.

Ces lois ont été déterminées par Coulomb, au moyen de sa balance de torsion. Les aimants étudiés par lui étaient des aiguilles d'acier aimantées; on sait que de pareils aimants présentent deux pôles vers leurs extrémités et que ces pôles ne sont pas identiques, car un aimant mobile abandonné à lui-même s'oriente sous l'action de la terre, de manière que le même pôle soit toujours dirigé vers le nord, tandis que l'autre se dirige vers le sud. On sait, en outre, que les actions magnétiques sont des attractions ou des répulsions, suivant que l'on met en présence deux pôles de noms contraires ou deux pôles de même nom.

Les expériences de Coulomb lui montrèrent d'abord que ces actions s'exercent en raison inverse du carré des distances. Il chercha ensuite à étendre cette première loi et à voir si les actions magnétiques ne pouvaient pas, comme les actions électriques, être représentées par une formule semblable à celle de la gravitation universelle, c'est-à-dire s'il n'existait pas, pour un aimant, une grandeur déterminée et mesurable qui pût être assimilée à la masse.

Pour s'en assurer, Coulomb compara, au moyen de la

balance de torsion, les actions exercées sur un système magnétique mobile, par deux pôles de même nom a et a'. Dans la pratique, on ne peut pas réaliser un pôle isolé, comme on obtient un corps chargé d'une seule espèce d'électricité; on le montre par l'expérience connue des aimants brisés. Il faut alors choisir des aimants assez longs pour que l'action du pôle opposé à celui que l'on considère soit négligeable. Dans ces conditions, l'expérience montre que, si les pôles a et a' sont placés à la même distance de l'aiguille mobile, les actions exercées sont dans un rapport constant, quelle que soit cette distance.

On peut alors prendre ce rapport comme étant celui des quantités de magnétisme des deux pôles considérés; par suite, on pourra représenter la quantité de magnétisme ou la masse magnétique d'un pôle par un nombre q en comparant son action sur un même système magnétique à celle d'un pôle déterminé pris pour unité.

Si, d'ailleurs, ce système magnétique est lui-même un pôle seul, l'action sera proportionnelle à sa masse magnétique q', de sorte que l'action entre les deux pôles pourra être représentée par la formule

$$f = k\frac{qq'}{r^2},$$

k étant un coefficient qui variera avec l'unité adoptée pour la masse magnétique.

On peut convenir de donner le signe $+$ au pôle nord et le signe $-$ au pôle sud; la formule précédente permet alors de connaître non seulement l'intensité, mais le sens de la force agissant entre les masses magnétiques q, q' affectées chacune de leur signe.

Il résulte de ce qui précède que la loi des actions élémentaires est la même pour les masses magnétiques que pour les masses électriques; par conséquent, tout ce que nous avons dit au sujet du potentiel électrique peut s'appliquer au potentiel magnétique.

Un aimant produira autour de lui un *champ magnétique* dont chaque point sera caractérisé par une valeur du potentiel magnétique, c'est-à-dire par le travail qu'il faudrait dépenser pour transporter une quantité de magnétisme positif égale à l'unité depuis un point fixe choisi comme point de comparaison jusqu'au point considéré. Il y aura, par suite, des surfaces équipotentielles ou surfaces de niveau magnétique et les normales à ces surfaces sont les lignes de force tangentes en chaque point à la direction de la force.

On peut prendre, pour définir un champ, soit les surfaces de niveau, soit les lignes de force; dans le premier cas, un élément du champ est caractérisé par la surface de niveau qui y passe et la valeur du potentiel correspondant à cette surface; dans le second cas, cet élément est caractérisé par les lignes de force qui y passent et l'intensité de la force en ce point, cette force étant, comme nous l'avons vu, la dérivée du potentiel par rapport à la normale.

Lorsqu'il s'est agi d'un champ électrique, nous avons employé le premier mode de représentation; pour un champ magnétique, au contraire, on préfère habituellement le second. Cette préférence provient en partie des études faites par Faraday sur les lignes de force et surtout de la possibilité de les réaliser matériellement, en répétant l'expérience classique des spectres magnétiques, due à Gilbert.

Considérons le champ magnétique formé par une masse q, concentrée en un point O (*fig.* 10); nous savons que les surfaces de niveau sont des sphères ayant pour centre le point O; les lignes de force sont donc des droites rayonnant du point O. Prenons deux sphères S, S′ de rayons r, r' correspondant aux potentiels U, U′ et considérons sur la sphère S un élément de surface ds; les lignes de force qui passent par le contour de cet élément forment un cône ayant son sommet en O et qui découpe sur S′ un élément ds', tel que

$$\frac{ds'}{ds} = \frac{r'^2}{r^2}.$$

Or la force sur ds est $f = \frac{q^2}{r^2}$ et, sur ds', elle est $f' = \frac{q^2}{r'^2}$; on a donc

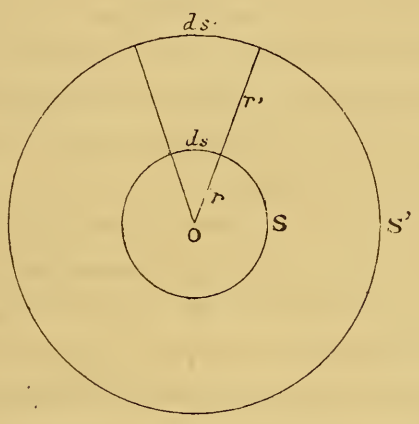
$$\frac{f}{f'} = \frac{r'^2}{r^2} = \frac{ds'}{ds},$$

d'où

$$f\,ds = f'\,ds'.$$

On désigne quelquefois le produit $f\,ds$ sous le nom de *flux de force*, et l'égalité précédente signifierait que les flux de force correspondant aux éléments ds, ds' sont égaux. On

Fig. 10.



exprime le même fait, en employant les notations de Faraday, de la manière suivante : supposons que sur un élément ds d'une surface de niveau S, servant de terme de comparaison, on prenne seulement un certain nombre de lignes de force uniformément réparties à raison de n par unité de surface. Si nous déterminons les intersections de ces lignes avec la surface S', il y en aura toujours n pour l'élément correspondant ds'; mais le nombre n' par unité de surface sera tel que

$$\frac{n}{n'} = \frac{ds'}{ds};$$

on aura donc

$$\frac{f}{f'} = \frac{n}{n'}.$$

C'est ce que Faraday exprimait d'une manière abrégée en disant qu'en chaque point du champ la force est proportionnelle au nombre des lignes de force. On voit, d'après cela, comment il faut comprendre cette expression de *nombre des lignes de force* en un point donné, qui n'a aucun sens par elle-même.

Dans ce qui précède, nous avons considéré un cas particulier très simple, afin de faciliter les explications; mais on peut démontrer facilement, en appliquant le calcul au cas général, que si l'on prend sur deux surfaces de niveau S, S' d'un champ magnétique quelconque des éléments ds, ds' ayant leurs contours limités par les mêmes lignes de force, les flux de force sur ces éléments sont égaux, ou bien encore que la force sur chaque élément est proportionnelle au nombre des lignes de force, cette dernière expression étant comprise comme la comprenait Faraday.

Lorsqu'il s'agit d'un champ magnétique, la force en un point prend le nom d'*intensité du champ;* c'est l'intensité de la force qui agirait sur une masse positive égale à l'unité, placée en ce point.

Si l'on considère une portion d'un champ magnétique peu étendue et située à une grande distance des masses agissantes, on pourra, dans cette portion, regarder les lignes de force comme parallèles et uniformément réparties. Un pareil champ dont l'intensité est constante est appelé un *champ uniforme*. Nous en avons un exemple dans le champ magnétique terrestre, qui peut être considéré comme uniforme dans la petite région où se passent les expériences. Cette remarque a conduit Coulomb à des conséquences importantes, au point de vue de la répartition du magnétisme dans les aimants.

Nous avons dit qu'on distingue, dans un aimant, deux pôles, c'est-à-dire deux régions où semble s'être accumulé le magnétisme, ces deux quantités de magnétisme étant d'ailleurs de signes contraires; nous pouvons maintenant définir les pôles d'une façon plus précise. Pour cela, plaçons un

aimant dans un champ magnétique uniforme; remarquons d'abord que dans un aimant le magnétisme pénètre plus ou moins profondément le corps qui lui sert de support, comme le fait l'électricité sur un corps mauvais conducteur. Par conséquent, si nous supposons notre aimant décomposé en volumes élémentaires, chacun de ces éléments sera soumis à une action proportionnelle à la quantité de magnétisme qu'il renferme. Le champ initial étant uniforme, toutes ces forces sont parallèles et si nous considérons celles qui agissent sur le magnétisme positif, elles ont une résultante appliquée en un certain point de l'aimant; c'est ce point ainsi nettement défini qui constitue le pôle nord ou positif de l'aimant. Le pôle sud ou négatif sera de même le point d'application de la résultante des actions sur chaque masse magnétique négative de l'aimant. On donne le nom d'*axe magnétique* à la ligne qui joint les deux pôles, sa direction étant comptée du pôle négatif vers le pôle positif.

Lorsqu'en particulier le champ uniforme est le champ magnétique terrestre, Coulomb a montré que l'action résultante de la terre ne comprend ni composante horizontale, ni composante verticale; cette action est donc purement directrice et, par suite, se réduit à un couple. Or les forces de ce couple sont égales respectivement aux masses positive et négative multipliées par un même facteur dépendant de l'intensité du champ magnétique terrestre. Il en résulte que ces masses sont égales en valeur absolue.

Ainsi, dans tout aimant, la somme des masses positives est égale à la somme des masses négatives et l'on a

$$\sum q = 0.$$

Nous avons vu que l'action d'un champ magnétique uniforme sur un aimant se réduit à un couple. Le moment de ce couple est évidemment proportionnel au produit ql, dans lequel q est la valeur absolue de la masse de chaque pôle et

l la longueur de l'axe magnétique. Ce produit est appelé le *moment magnétique* de l'aimant.

Il est évident, d'après cela, qu'un aimant mobile placé dans un champ magnétique uniforme s'orientera de manière que son axe soit parallèle aux lignes de force et, en général, un aimant de petites dimensions s'orientera dans un champ quelconque, de telle sorte que son axe soit tangent à une ligne de force ([1]). Dans l'expérience des spectres magnétiques, les grains de limaille s'orientent comme de petits aimants et s'accolent en reproduisant la forme des lignes de force.

Nous avons dit que Faraday s'était livré à une étude approfondie des lignes de force; il en avait déduit la possibilité de traduire leurs propriétés au moyen des lois suivantes :

Toute ligne de force tend toujours à être aussi courte que possible; c'est-à-dire qu'on doit se figurer une ligne de force comme un fil élastique dont les points d'attache sont ceux où elle pénètre dans l'aimant. Il semblerait, d'après cette loi que, dans un même milieu, les lignes de force doivent toujours être rectilignes, mais la loi suivante vient modifier leur forme.

([1]) On fait usage de cette remarque, lorsqu'on détermine les constantes du champ magnétique terrestre. On obtient, en chaque lieu, la direction de la force, au moyen de l'orientation que prendrait en ce lieu l'axe magnétique d'une aiguille aimantée, mobile dans tous les sens autour de son milieu. Comme d'ailleurs il serait assez difficile de réaliser une pareille aiguille, cette détermination se fait au moyen de deux angles, l'un qui est l'angle que fait le plan vertical contenant l'aiguille ou *méridien magnétique,* avec le méridien géographique, l'autre qui est l'angle que fait, dans ce plan, l'aiguille avec l'horizontale. Le premier de ces angles est la *déclinaison,* le deuxième est l'*inclinaison.*

Quant à l'intensité du champ, on se contente habituellement d'en déterminer la composante horizontale; connaissant cette composante et l'inclinaison, il est facile d'en déduire l'intensité totale.

Les différents appareils employés à ces mesures permettent en outre de suivre les variations des constantes magnétiques en un même point du globe.

Deux lignes de force parallèles et de même sens se repoussent (1). D'après cette loi, elles doivent donc s'écarter pour prendre une forme courbe conforme à l'expérience et représentant l'état d'équilibre entre les actions contraires indiquées par chaque loi.

Les lois de Faraday permettent de déterminer approximativement la forme générale des lignes de force dans un champ magnétique; elles permettent également de prévoir les sens et la nature des actions qui s'exerceront entre différents corps magnétiques; mais, d'autre part, elles ne peuvent fournir de renseignements sur les intensités de ces actions. Elles ne seront donc d'aucun secours, lorsqu'on voudra appliquer le calcul aux phénomènes.

Quoi qu'il en soit, nous ferons encore sur les lois de Faraday la remarque suivante. Ces lois supposent que les lignes de force restent toujours dans le même milieu. Si le champ magnétique renferme des corps différant les uns des autres au point de vue magnétique, les lignes de force se trouveront déformées, comme le sont les surfaces de niveau électrique, lorsque le diélectrique qui forme le champ électrique n'est pas partout le même.

Nous avons dit plus haut qu'on pouvait ranger tous les corps dans un ordre déterminé par l'intensité de l'action qu'ils éprouvent de la part d'un aimant, c'est-à-dire que, dans un champ magnétique, la force est d'autant plus grande que cette portion du champ est occupée par un corps ayant un plus grand pouvoir magnétique. Nous avons vu, d'ailleurs, que la force est proportionnelle au nombre des lignes de force; il en résulte que les lignes de force doivent se resserrer dans les portions du champ qui sont les plus magnétiques, tandis qu'elles se raréfient dans les autres. C'est ce que vérifie l'expérience et nous verrons que cette propriété

(1) Le sens d'une ligne de force est celui de l'axe magnétique d'un petit aimant mobile qui serait placé tangentiellement à la ligne de force.

importante a été appliquée dans la construction des machines électriques.

Cette propriété permet aussi d'expliquer facilement des expériences connues. Prenons un champ magnétique constitué par un milieu homogène qui sera, par exemple, de l'air et plaçons dans ce champ un petit barreau, c'est-à-dire un corps ayant une de ses dimensions plus grandes que les autres. Si la substance du barreau est magnétique, c'est-à-dire a un pouvoir magnétique supérieur à celui de l'air, les lignes de force se resserreront dans ce corps et, s'il est mobile, il s'orientera de manière à être traversé par elles dans le sens de sa plus grande dimension; c'est ce qu'on observe avec un barreau de fer qui se place parallèlement aux lignes de forces. Si, au contraire, la substance du barreau est diamagnétique, c'est-à-dire a un pouvoir inférieur à celui de l'air, le barreau s'orientera de manière à être traversé par les lignes de force suivant sa plus petite dimension; c'est ce qu'on observe sur un barreau de bismuth qui se place perpendiculairement aux lignes de force.

Actions électrodynamiques et électromagnétiques. — L'expérience d'Oerstedt qui a conduit à la construction du galvanomètre montre qu'un fil traversé par un courant agit sur un aimant et peut lui faire prendre une nouvelle position d'équilibre. Dans ce cas, le courant modifie le champ magnétique et cette modification provient de ce que le courant seul produit lui-même un champ magnétique. Il suffit, pour s'en convaincre, de plonger le fil dans la limaille de fer; les parcelles métalliques s'attachent au fil tant qu'il est parcouru par le courant. Le spectre magnétique vérifie que le champ produit par un courant rectiligne est caractérisé par des lignes de force qui sont des cercles concentriques au fil et ayant leurs plans perpendiculaires à son axe; on le démontre également par le calcul.

Puisqu'un courant produit un champ magnétique, deux

courants doivent agir l'un sur l'autre et, si les circuits qu'ils traversent sont rendus mobiles, ces actions se manifesteront par des mouvements relatifs des deux circuits.

La considération des lignes de force et des lois de Faraday permettra alors de déterminer le sens et la nature des actions, soit des courants entre eux, soit des aimants entre eux, soit, enfin, des aimants et des courants. La plupart des expériences instituées pour montrer ces actions les montrent sous forme de rotation et l'on peut, comme on le sait, les varier d'une infinité de manières.

Néanmoins, si les lignes de forces permettent de se rendre compte facilement de ces phénomènes et d'expliquer d'une manière claire toutes ces expériences, cette méthode n'est, pour ainsi dire, que qualitative et, au milieu de l'admiration que peuvent et doivent exciter les travaux de Faraday, il ne faut pas oublier que c'est un physicien français qui a, le premier, appliqué le calcul à ces phénomènes et qui a pu, par conséquent, non seulement déterminer le sens des actions qui se produisent, mais encore les mesurer.

C'est en effet à Ampère que sont dues les formules qui régissent les actions des aimants et des courants. La méthode suivie par Ampère est la suivante : après avoir d'abord calculé les actions élémentaires, il a vérifié ses formules par l'expérience. Mais, comme cette vérification ne pouvait se faire qu'en opérant sur des actions finies, celles-ci étaient déduites des formules élémentaires, en choisissant des conditions où les intégrations étaient possibles.

Nous n'avons pas à reproduire ici les calculs d'Ampère; il nous suffira d'indiquer les résultats qu'il a obtenus, en donnant seulement les formules des actions élémentaires, dont nous aurons à faire usage par la suite.

Prenons d'abord les actions des courants sur les courants. Si l'on représente par $d^2\varphi$ l'action qui s'exerce entre deux éléments ds, ds' traversés par des courants d'intensité i, i', on a, en désignant par r la distance des éléments, par θ, θ'

les angles qu'ils forment avec la droite qui joint leurs milieux et par ω l'angle qu'ils forment entre eux,

$$d^2\varphi = k\,\frac{ii'\,ds\,ds'}{r^2}\left(\cos\omega - \tfrac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right).$$

Le coefficient k est une constante qui dépendra des unités adoptées et la force sera dirigée suivant la droite qui joint les milieux des éléments.

S'il s'agit au contraire des actions exercées entre un pôle dont la masse magnétique est q et un élément de circuit ds traversé par un courant d'intensité i, la formule trouvée par Ampère pour exprimer l'intensité de l'action $d\varphi'$ est

$$d\varphi' = k'\,\frac{q\,i\,ds}{r^2}\sin\alpha,$$

dans laquelle r est la distance du pôle à l'élément considéré, α l'angle de l'élément avec la droite qui le joint au pôle et k' un coefficient qui variera avec les unités adoptées. Dans ce cas, la force est perpendiculaire au plan déterminé par l'élément et le pôle; quant à son sens, on le trouve par la règle connue, donnée par Ampère pour interpréter l'expérience d'Oerstedt. On se suppose placé dans le courant, de façon qu'il entre par les pieds pour sortir par la tête et de manière à regarder le pôle magnétique. Si celui-ci est positif, c'est-à-dire nord, il tend à marcher de droite à gauche. S'il est négatif, c'est-à-dire sud, il tend à marcher de gauche à droite.

Unités. — Nous avons passé en revue les différentes grandeurs que l'on peut avoir à évaluer dans l'étude des phénomènes électriques ou magnétiques, ainsi que les relations qui existent entre ces grandeurs. Il nous reste encore à dire au moyen de quelles unités on les mesure. Ces unités ont été discutées par le Congrès réuni en 1881, à Paris, à l'occasion de l'Exposition d'électricité et une convention internationale les a fait adopter par toutes les nations qui avaient pris part au Congrès.

D'après la définition, mesurer une grandeur c'est la comparer à une grandeur de même espèce prise pour unité. Le nombre qui exprime ce rapport représente alors la mesure de la grandeur considérée.

Il est clair que chaque grandeur prise pour unité pourrait être choisie arbitrairement, et c'est ce qui a été fait dans l'origine. Les unités de longueur étaient prises dans le corps humain, comme la coudée, le pied, le pas, etc.; les unités de surface, de volume, de poids étaient déterminées par des conditions tout aussi arbitraires et sans aucun lien avec les précédentes. Cette manière de procéder présentait de nombreux inconvénients sur lesquels il n'est pas nécessaire d'insister et dont le plus grave était de masquer les relations existant entre les grandeurs de natures différentes; aussi n'a-t-on point tardé à relier les unités de surface et de volume à l'unité de longueur en prenant respectivement pour ces unités le carré et le cube qui ont pour côté l'unité de longueur.

Mais les unités de poids restaient indépendantes des autres et c'est seulement le système métrique qui les réunit toutes en adoptant une seule unité arbitraire, celle de longueur, dont on déduit les unités de surface, de volume et de poids. L'unité de longueur constitue alors une unité dite *fondamentale,* les autres étant nommées des unités *dérivées.*

Ces conventions une fois adoptées, l'unité fondamentale reste donc seule arbitraire et l'on s'était proposé de la déterminer en la prenant dans la nature, de telle sorte que si, à un moment donné, tous les étalons de mesure étaient détruits, on pût les reproduire à nouveau. A la vérité, la réalisation de cette dernière condition est un peu illusoire; on sait aujourd'hui que le mètre n'est pas exactement la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, qui n'est pas d'ailleurs lui-même absolument invariable et, en réalité, le mètre n'est que la longueur de l'étalon conservé aux Archives. De même, le kilogramme-étalon n'est pas rigoureuse-

ment le poids d'un décimètre cube d'eau à son maximum de densité. On n'a pas cependant, pour cela, modifié les étalons, ce qui aurait altéré toutes les mesures déjà prises.

Il existe donc un désaccord entre la théorie et la pratique : ce désaccord a même été présenté comme une objection au Congrès de 1881; néanmoins, le Congrès a pensé qu'il fallait avant tout ne pas se priver des avantages que présentent des relations simples entre les différentes unités. En effet, tant qu'il s'agira seulement de transformations de calcul, les formules se trouveront allégées de coefficients numériques qui, dans certains cas, pourraient masquer des relations importantes, et, quand on en viendra à la réalisation matérielle, celle-ci sera ce qu'elle est toujours, c'est-à-dire plus ou moins imparfaite; il sera temps à ce moment d'introduire des corrections dans les résultats du calcul.

Lorsqu'on veut étendre les mesures aux différentes branches des sciences physiques, les unités comprises dans le système métrique sont insuffisantes et l'on se trouve en présence de grandeurs nouvelles à mesurer, d'où nécessité de créer de nouvelles unités. En ce qui concerne les phénomènes calorifiques, on sait quelles ont été les conventions adoptées pour évaluer les températures et les quantités de chaleur; le degré et la calorie ont été choisis d'une façon absolument arbitraire. On ne pensait pas, au moment de leur adoption, à les subordonner aux unités mécaniques, attendu qu'on ne connaissait pas de relations entre les phénomènes calorifiques et les phénomènes mécaniques. Ces relations ont été découvertes alors que les physiciens étaient déjà accoutumés à un système de mesures et, au lieu de changer les unités calorifiques, on préféra déterminer un coefficient numérique permettant de les relier aux unités mécaniques : ce coefficient est l'équivalent mécanique de la chaleur.

Dans le cas des phénomènes électriques, la question se présente autrement. Tout d'abord, les diverses grandeurs électriques furent mesurées au moyen d'unités arbitraires et

l'on peut même dire que chacun avait les siennes. C'est ainsi qu'il y avait pour chaque pays une unité particulière de résistance. Toutefois, les mesures électriques étaient peu répandues et ne sortaient pas du domaine de la théorie pure; mais les usages de l'électricité devenant de jour en jour plus nombreux, on ressentit bientôt la nécessité de leur appliquer le calcul et d'effectuer des mesures facilement comparables entre elles. C'est pour répondre à ce besoin que l'Association Britannique proposa un système d'unités rationnelles dit système absolu, comprenant les unités mécaniques et les unités électriques. Des étalons furent même réalisés à la suite d'expériences faites en 1863 et 1864.

Néanmoins le système de l'Association Britannique ne fut guère appliqué qu'en Angleterre, et c'est seulement au Congrès de 1881 à Paris qu'une convention internationale établit les bases du système définitif adopté aujourd'hui. On prit d'ailleurs, comme point de départ, le système de l'Association Britannique en lui faisant subir un certain nombre de modifications.

Dimensions des unités mécaniques, système C.G.S. — Il résulte de ce qui précède que le système d'unités de 1881 comprend non seulement les unités électriques, mais encore les unités mécaniques. Il en résulte aussi qu'il ne peut pas y avoir en électricité de coefficient correspondant à l'équivalent mécanique de la chaleur et que parler du coefficient mécanique de l'électricité est une absurdité, puisque les unités électriques dépendent directement des unités mécaniques.

Un pareil système d'unités constitue ce qu'on nomme un *système absolu*. Le mot *absolu*, assez mal choisi d'ailleurs, signifie ici qu'il s'agit d'un système d'unités dans lequel on a pris le plus petit nombre possible d'unités fondamentales, toutes les autres étant des unités dérivées.

Il est clair d'ailleurs qu'on aura autant de systèmes absolus qu'on voudra, en faisant varier les unités fondamentales. Le premier système absolu introduit dans la Science est dû à

Gauss et à Weber; puis vint celui de l'Association Britannique et enfin le système absolu de 1881 que nous allons résumer.

Les travaux de l'Association Britannique avaient montré que toutes les unités électriques peuvent être rattachées aux unités mécaniques et être par conséquent des unités dérivées. La première chose à faire est donc de définir les unités fondamentales permettant d'effectuer toutes les mesures mécaniques.

Si, comme on le fait souvent, on commence l'étude de la Mécanique par la Cinématique, les grandeurs que l'on a à évaluer d'abord sont : la longueur, le temps, la vitesse et l'accélération. Il est facile de voir que si l'on se donne comme unités fondamentales les unités de longueurs et de temps, on pourra en déduire aisément les unités de vitesse et d'accélération. On sait en effet que, dans un mouvement uniforme, on a la relation

$$e = vt.$$

Si le mobile parcourt l'unité de longueur pendant l'unité de temps, sa vitesse est $v = 1$. Désignons par le symbole [L] l'unité de longueur, par [T] l'unité de temps et en général par $[x]$ l'unité de la grandeur mesurée par le nombre x; nous pourrons écrire

$$[v] = \frac{[\mathrm{L}]}{[\mathrm{T}]}$$

ou, pour abréger,

$$[v] = [\mathrm{LT}^{-1}].$$

L'égalité qui précède indique comment l'unité de vitesse, qui est une unité dérivée, est rattachée aux unités de longueur et de temps. On dit qu'elle représente les *dimensions* de l'unité dérivée considérée. Cette égalité permet de voir comment varierait l'unité dérivée, si l'on modifiait les unités fondamentales. Dans le cas choisi ci-dessus, elle montre que si l'on fait varier dans le même rapport les unités de longueur et de temps, l'unité de vitesse ne change pas.

On voit, d'après cela, que les dimensions de l'unité de

surface seraient $[L^2]$, celles de l'unité de volume seraient $[L^3]$. Quant aux dimensions de l'unité d'accélération, on les obtiendra en se reportant à la définition de l'accélération qui est la variation de la vitesse pendant l'unité de temps. Par conséquent, l'unité d'accélération sera l'accélération d'un mouvement dans lequel la vitesse varierait de l'unité de vitesse pendant l'unité de temps. On aura donc, en la désignant par γ,

$$[\gamma] = \frac{[v]}{[T]} = \frac{[LT^{-1}]}{[T]} = [LT^{-2}].$$

On aurait également pu trouver ce résultat en partant de l'équation du mouvement uniformément varié dans lequel l'accélération est constante.

Disons de suite que l'unité de longueur adoptée a été le centimètre, c'est-à-dire la centième partie de l'étalon des Archives et que l'unité de temps est la seconde, c'est-à-dire la 86400e partie du jour solaire moyen.

Lorsqu'on poursuit l'étude de la Mécanique, et qu'on arrive à la Dynamique, on se trouve en présence de nouvelles grandeurs à évaluer qui sont la force et la masse. On sait que l'unité de force ordinairement adoptée dans la pratique était le kilogramme, c'est-à-dire qu'on prenait la pesanteur comme terme de comparaison des forces entre elles. D'autre part, le théorème de la proportionnalité des forces aux accélérations qu'elles produisent en agissant sur des corps de même masse montre que les unités de force et de masse peuvent être facilement déduites l'une de l'autre. Il semble donc que l'on n'avait pas besoin de recourir à une nouvelle unité fondamentale, puisque l'unité de poids, dans le système métrique, est déjà reliée à l'unité de longueur. Mais il faut remarquer que le mètre n'est pas en réalité la seule unité fondamentale du système métrique et que la convention qui relie l'unité de poids à l'unité de longueur admet que la densité de l'eau est prise comme unité de densité. En outre, ainsi que nous l'avons dit plus haut, cette relation n'est pas rigoureusement exacte,

en ce qui concerne le kilogramme-étalon et le mètre-étalon des Archives.

On était donc amené à choisir une troisième unité fondamentale qui pouvait être, soit l'unité de force, soit l'unité de masse. La première solution présentait cet inconvénient qu'en prenant pour unité de force un poids, un étalon construit pour un lieu déterminé ne pouvait pas servir pour un autre lieu, puisque l'intensité de la pesanteur n'est pas la même en tous les points du globe.

Le Congrès de 1881 a donc conclu, comme l'avait fait l'Association Britannique, à l'adoption de l'unité de masse comme troisième unité fondamentale.

Il faut bien d'ailleurs reconnaître que la notion de force tend aujourd'hui à disparaître de la Mécanique. Certaines théories vont même jusqu'à en nier l'existence, admettant seulement des modifications du mouvement et de la force vive. Avec ces considérations, la masse seule intervient dans les calculs; on est par suite admis à considérer comme plus rationnelle la solution adoptée par le Congrès.

Dans cet ordre d'idées, la troisième unité fondmentale du système absolu est la masse du gramme à Paris, c'est-à-dire la millième partie de la masse du kilogramme-étalon déposé aux Archives.

Les unités fondamentales étant déterminées ainsi que nous venons de le dire, le système absolu adopté par le Congrès de 1881 est ordinairement désigné sous le nom de *système C.G.S.* (centimètre-gramme-seconde).

Voyons maintenant les dimensions des différentes unités dérivées.

Prenons d'abord la force; nous aurons ses dimensions en remarquant que, par définition, la masse d'un corps est égale au rapport de l'intensité d'une force à l'accélération du mouvement que cette force donnerait au corps, en agissant sur lui d'une manière constante. Nous prendrons donc pour unité de force la force qui, agissant sur l'unité de masse,

lui communiquerait un mouvement dont l'accélération serait égale à l'unité d'accélération. Par conséquent, si $[f]$ est l'unité de force et $[M]$ l'unité de masse, on aura

$$[M] = \frac{[f]}{[\gamma]},$$

d'où

$$[f] = [M\gamma] = [MLT^{-2}].$$

Après la force vient le travail; le travail d'une force étant égal à l'intensité de la force multipliée par le chemin parcouru par son point d'application, lorsque celui-ci se déplace suivant la direction de la force, l'unité de travail pourra être définie : la quantité de travail effectuée par une force égale à l'unité de force faisant parcourir à son point d'application, suivant sa direction, un trajet égal à l'unité de longueur. Si donc $[W]$ est l'unité de travail, nous aurons

$$[W] = [fL] = [ML^2T^{-2}].$$

On arriverait au même résultat en définissant le travail par la force vive. Dans ce cas, l'unité de travail est le travail effectué par un corps de masse égale à 2 fois l'unité de masse qui, partant du repos, acquiert une vitesse égale à l'unité de vitesse. On a alors

$$[W] = \tfrac{1}{2}\,2\,[M][v]^2 = [ML^2T^{-2}].$$

Dans le système métrique, on avait donné des noms aux différentes unités, ainsi qu'à leurs multiples et sous-multiples. Parmi les unités mécaniques du système C.G.S., celles de force et de travail sont les seules qui aient reçu des noms particuliers : la première est la *dyne,* la seconde est l'*erg*.

On sait que ces unités ne sont pas celles qui sont ordinairement employées dans la pratique, au moins jusqu'à présent; on était habitué à prendre pour unité de force le kilogramme et pour unité de travail le kilogrammètre, c'est-à-dire le travail nécessaire pour élever un kilogramme à un mètre de hauteur. Il est donc utile, pour un certain temps

encore, de savoir comment on peut passer de ces unités à celles du système absolu C.G.S. ou réciproquement.

Nous avons défini la dyne la force qu'il faut appliquer à l'unité de masse pour lui communiquer l'unité d'accélération. Par conséquent, si g est l'accélération due à la pesanteur, le poids de l'unité de masse vaut g dynes, g étant exprimé en centimètres. A Paris, cette valeur est 980,88; donc un gramme vaut 980,88 dynes et une dyne vaut

$$\frac{1^{gr}}{980,88} = 0^{gr},001019.$$

Un kilogramme vaudrait : 980 880 dynes.

Quant au kilogrammètre, il sera égal à

$$980880 \times 100 = 9,8088 \times 10^7 \text{ ergs}.$$

Dimensions des unités électriques. — Nous arrivons maintenant aux unités électriques et magnétiques. Les principales grandeurs que l'on ait à employer dans les calculs et les seules dont nous nous occuperons sont : la quantité d'électricité Q, le potentiel V ou la force électromotrice E qui est mesurée par la différence de deux potentiels, la capacité C, l'intensité I, la résistance R, auxquelles il faut joindre la masse magnétique q.

Nous avons rappelé précédemment les relations qui existent entre ces différentes grandeurs; ces relations sont les suivantes :

1° La relation qui définit l'intensité d'un courant par la quantité d'électricité qui traverse une section du conducteur, pendant l'unité de temps; si Q est la quantité qui passe pendant le temps t, on a

$$Q = It; \tag{1}$$

2° La relation qui définit la capacité d'un condensateur : la charge qu'il faut lui donner, pour qu'il y ait entre ses arma-

tures une différence de potentiel égale à l'unité [1]; si cette différence est égale à E pour une charge Q, on a

$$Q = CE; \tag{2}$$

3° La loi de Ohm qui définit la résistance d'un circuit, le facteur par lequel il faut diviser la force électromotrice ou la différence des potentiels aux extrémités de ce circuit, pour obtenir l'intensité du courant qui le traverse

$$E = RI; \tag{3}$$

4° La loi de Joule, qui exprime que le travail effectué par l'unité d'électricité positive passant d'un point à un autre d'un conducteur est égal à la différence de potentiel entre ces deux points

$$W = QE = RI^2 t; \tag{4}$$

5° La formule de Coulomb, relative aux actions électriques; en supposant égales entre elles les masses agissantes, elle devient

$$f = k \frac{Q^2}{r^2}; \tag{5}$$

6° La formule de Coulomb, relative aux actions magnétiques, qui peut s'écrire, comme la précédente,

$$f_1 = k_1 \frac{q^2}{r^2}; \tag{6}$$

---

[1] Bien que précédemment nous ayons défini séparément la capacité d'un conducteur et celle d'un condensateur, dans la pratique le mot *capacité* s'applique toujours à un condensateur et l'expression *capacité d'un conducteur* n'a aucun sens, car le potentiel produit par une même charge varie avec la position des conducteurs voisins, et, lorsque nous avons défini la capacité d'un conducteur isolé, nous avons admis implicitement que ce conducteur était seul dans l'espace, ce qui est irréalisable; il y aura toujours dans son voisinage d'autres corps conducteurs, dont il sera séparé par un diélectrique, c'est-à-dire qu'il constituera une des armatures d'un condensateur. C'est donc seulement en le comparant à un autre condensateur, choisi comme type, qu'on pourra mesurer sa capacité.

7° La formule d'Ampère, relative aux actions réciproques de deux éléments de courants qui, en supposant les éléments égaux et traversés par des courants de même intensité, devient

$$(7) \qquad f_2 = k_2 \frac{I^2 \overline{ds}^2}{r^2} (\cos\omega - \tfrac{3}{2} \cos\theta \cos\theta');$$

8° Enfin la formule d'Ampère relative aux actions qui s'exercent entre un pôle et un élément de courant

$$(8) \qquad f_3 = k_3 \frac{q I ds}{r^2} \sin\alpha.$$

Parmi ces relations, les quatre premières sont de simples définitions et ne comportent pas de coefficients; les autres, au contraire, expriment des lois expérimentales et renferment des coefficients indéterminés k, k_1, k_2, k_3.

Les grandeurs que nous avons à mesurer sont au nombre de six; si nous avions six équations analogues aux relations (1), (2), (3) et (4), nous pourrions exprimer ces six grandeurs en fonction des quantités mécaniques W, t, f que renferment les équations et nous en déduirions les dimensions des unités électriques, en fonction des unités fondamentales. Il y aurait alors un système absolu unique.

Mais, en réalité, nous n'avons que quatre équations; il faudra donc en prendre deux autres dans les relations (5), (6), (7) et (8) et admettre que les unités sont choisies de telle sorte que les coefficients qu'elles renferment prennent des valeurs numériques déterminées. C'est ainsi que, si l'on convient de prendre pour unité de quantité d'électricité la quantité qui, agissant sur une quantité égale placée à l'unité de distance, produirait une action égale à l'unité de force, cela revient à supposer $k = 1$ dans l'équation (5).

On est conduit à se demander tout d'abord si l'on a le droit de faire disparaître ainsi ces coefficients, ce qui revient à admettre qu'ils sont purement numériques; on peut répondre qu'*a priori* on n'est pas autorisé à agir ainsi. Il faut remar-

quer en effet que les équations (5), (6), (7), (8) expriment des lois relatives à des actions à distance. Or nous avons dit déjà que l'on a de fortes raisons pour supposer que les actions à distance n'existent pas et qu'il faut faire intervenir le milieu intermédiaire. On doit, par suite, en conclure que les coefficients en question pourraient varier, si l'on faisait varier les milieux dans lesquels se produisent les actions.

C'est afin de vérifier ces prévisions que MM. Mercadier et Vaschy ont entrepris des expériences qui ont montré qu'en effet, lorsqu'on fait varier le milieu interposé, le coefficient k ne reste pas le même et que, comme il était facile de le prévoir, ce coefficient varie avec le pouvoir inducteur spécifique du milieu. Quant aux coefficients k_1, k_2, k_3, qui sont relatifs aux actions magnétiques ou électrodynamiques, les expériences ont montré qu'ils restaient constants pour un grand nombre de substances. Cela ne veut pas dire cependant que ces coefficients soient purement numériques, et il est probable qu'avec des milieux différant notablement de l'air au point de vue magnétique, comme par exemple une dissolution de perchlorure de fer, on eût trouvé également des différences pour les valeurs de ces coefficients.

Il résulte de ce qui précède que si nous égalons à l'unité les coefficients des relations (5), (6), (7) ou (8), il faudra spécifier que les actions se passent dans l'air, car c'est seulement à la condition de rester dans le même milieu que l'on a le droit de considérer ces coefficients comme numériques.

D'après ce que nous venons de voir, nous pouvons, en faisant les restrictions indiquées, égaler à l'unité deux des coefficients k, k_1, k_2, k_3; nous aurons ainsi deux équations qui, jointes aux relations (1), (2), (3), (4), permettront de calculer les six grandeurs à mesurer : q, I, Q, R, E, C, en fonction des grandeurs mécaniques W, t, f, c'est-à-dire que nous aurons constitué un système absolu d'unités.

Nous n'entrerons pas dans l'étude détaillée des différents systèmes que l'on peut obtenir; nous dirons seulement qu'ils

se réduisent à deux systèmes réellement distincts, dont on peut déduire tous les autres en multipliant leurs unités par des coefficients numériques convenables.

Ces deux systèmes absolus sont ceux que l'on obtient en faisant, d'une part, $k = 1$, $k_3 = 1$ et, d'autre part, $k_1 = 1$, $k_3 = 1$; le premier est appelé système *électrostatique,* le second système *électromagnétique.*

Le deuxième système conduisant à des unités plus simples pour les grandeurs relatives aux courants, c'est ce système qui a été préféré et adopté par le Congrès de 1881; c'est donc le seul que nous décrirons ici.

Dans le système électromagnétique on définit la masse magnétique ou quantité de magnétisme q au moyen de la loi de Coulomb (6), dans laquelle on fait $k_1 = 1$, c'est-à-dire que l'unité de masse magnétique $[q]$ est la masse qui, agissant à l'unité de distance sur une masse identique, produirait une action égale à l'unité de force.

L'équation (6) donne, en faisant $k_1 = 1$,

$$q = r\sqrt{f}.$$

On en déduit, pour les dimensions de l'unité $[q]$,

$$[q] = [\mathrm{L}]\left[\sqrt{\mathrm{LMT}^{-2}}\right] = \left[\mathrm{L}^{\frac{3}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-1}\right].$$

L'unité d'intensité sera alors donnée par la formule (8); il faut remarquer toutefois que cette équation, étant une équation différentielle, ne conduit pas directement à une définition de l'unité d'intensité $[\mathrm{I}]$; il faut commencer par calculer l'action d'un courant de longueur finie et de forme connue sur un aimant. On peut d'ailleurs y arriver de plusieurs manières; il suffit pour cela de choisir des conditions telles que l'intégration soit possible.

On peut prendre par exemple un courant circulaire de rayon r dont le pôle magnétique de masse q serait le centre; dans ce cas, pour avoir l'action sur chaque élément de cou-

rant, il faudrait faire dans la formule (8), $\alpha = 90^\circ$. Toutes ces actions s'ajoutant, on aurait pour l'action sur un arc de longueur finie s

$$f = \frac{q\,\mathrm{I}\,s}{r^2}.$$

On voit que, si l'on fait $q = 1$, $s = 1$, $r = 1$ et $f = 1$, on aura $\mathrm{I} = 1$; donc l'unité d'intensité serait celle d'un courant qui, parcourant un arc de cercle de longueur égale à l'unité et de rayon égal à l'unité, produirait sur l'unité de masse magnétique placée au centre du cercle, une action égale à l'unité de force.

On pourrait encore remarquer que dans l'équation (8) $\frac{q}{r^2}$ est l'intensité H du champ magnétique au point où se trouve l'élément du courant ds; on a donc

$$f = \mathrm{HI}\,ds \sin\alpha,$$

qui est vraie quelle que soit l'origine du champ. Supposons-le uniforme; la force pour un fil rectiligne de longueur l est

$$f = \mathrm{HI}\,l \sin\alpha.$$

Si l'on fait $\sin\alpha = 1$, ce qui revient à placer le courant normal aux lignes de force et si, en outre, on fait $f = 1$, $\mathrm{H} = 1$ et $l = 1$, on a $\mathrm{I} = 1$. Donc l'unité d'intensité est aussi celle du courant rectiligne de longueur égale à l'unité qui, placé normalement aux lignes de force, dans un champ magnétique uniforme égal à l'unité, serait soumis à l'unité de force.

Quelle que soit la définition adoptée, on trouve pour les dimensions de l'unité d'intensité

$$[\mathrm{I}] = \frac{[f][\mathrm{L}^2]}{[q][\mathrm{L}]} = \left[\mathrm{L}^{\frac{1}{2}}\mathrm{M}^{\frac{1}{2}}\mathrm{T}^{-1}\right].$$

L'unité de quantité d'électricité se déduira alors de l'intensité au moyen de la relation (1). Ce sera la quantité qui, passant pendant l'unité de temps à travers une section d'un

conducteur produira un courant ayant l'unité d'intensité. On aura donc

$$[Q] = [I][T] = \left[L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}}\right].$$

L'unité de résistance se déduira de la loi de Joule (4). Ce sera, par conséquent, la résistance d'un conducteur qui, traversé par un courant d'intensité égale à l'unité, pendant l'unité de temps, recevrait une quantité de chaleur correspondant à l'unité de travail. Nous aurons donc

$$[R] = \frac{[W]}{[I^2][T]} = [LT^{-1}].$$

L'unité de force électromotrice s'obtiendra au moyen de la loi de Ohm; elle sera représentée par la différence de potentiel nécessaire pour produire un courant ayant une intensité égale à l'unité d'intensité, dans un circuit dont la résistance est égale à l'unité de résistance; donc

$$[E] = [RI] = \left[L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-2}\right].$$

Enfin la formule qui définit la capacité nous donnera l'unité de capacité; ce sera celle d'un condensateur qui, pour une charge égale à l'unité, aurait entre ses armatures une différence de potentiel égale à l'unité; on aura alors

$$[C] = \frac{[Q]}{[E]} = [L^{-1}T^2].$$

Unités pratiques. — Le système absolu d'unités, dit système C.G.S., étant ainsi déterminé, il ne restait plus qu'à donner des noms aux différentes unités, en vue de simplifier le langage, comme on l'avait fait pour les unités du système métrique. Nous avons déjà dit que, parmi les unités mécaniques, les seules qui eussent reçu des noms étaient les unités de force et de travail, la dyne et l'erg. Mais, quand on en vint aux unités électriques, on remarqua que les unités du système C.G.S. n'étaient pas en rapport avec les grandeurs

que l'on a à évaluer d'ordinaire dans la pratique, de sorte que les grandeurs mesurées avec ces unités se trouveraient représentées par des nombres les uns trop grands, les autres trop petits, incommodes dans tous les cas. On se décida alors à adopter comme unités pratiques, non pas les unités C.G.S. elles-mêmes, mais des multiples ou sous-multiples de ces unités, choisis de manière à se trouver en rapport convenable avec les grandeurs à mesurer, et c'est seulement à ces unités pratiques que l'on donna des noms. Ces noms sont les suivants :

L'*ohm* ou unité pratique de résistance, qui vaut 10^9 unités C.G.S ;

Le *volt* ou unité pratique de force électromotrice, qui vaut 10^8 unités C.G.S ;

L'*ampère* ou unité pratique d'intensité, qui vaut 10^{-1} unités C.G.S ;

Le *coulomb* ou unité pratique de quantité d'électricité, qui vaut 10^{-1} unités C.G.S ;

Le *farad* ou unité pratique de capacité, qui vaut 10^{-9} unités C.G.S ;

Pour la quantité de magnétisme et l'intensité de champ magnétique, on conserve les unités C.G.S. qui n'ont d'ailleurs pas reçu de noms particuliers.

Enfin les préfixes méga ou micro servent à désigner des multiples ou sous-multiples des unités pratiques et indiquent que ces unités sont multipliées par 10^6 ou 10^{-6} ; c'est ainsi qu'un *mégohm* vaut 10^{15} unités C.G.S. et qu'un *microfarad* vaut 10^{-15} unités C.G.S.

Pour déterminer les valeurs des unités pratiques, on n'a pas seulement cherché à les rendre comparables aux grandeurs à mesurer : on s'est aussi préoccupé, autant que possible, de ne pas modifier par des coefficients numériques les relations existant entre les différentes grandeurs.

Prenons la relation (1) entre la quantité d'électricité et l'intensité, qui est vraie lorsque les grandeurs Q et I sont évaluées en unités C.G.S. Il est facile de voir que cette rela-

tion sera encore vraie si l'on emploie les unités pratiques, le coulomb et l'ampère, puisque les unités sont respectivement égales aux unités absolues multipliées par le même facteur 10^{-1}. Par conséquent, si l'on prend un fil parcouru par un courant dont l'intensité est égale à 1 ampère, la quantité d'électricité qui traverse une section de ce fil pendant une seconde est égale à 1 coulomb.

La loi de Ohm (3) sera également satisfaite; en effet, si E est évalué en volts, au lieu de l'être en unités absolues, le résultat sera 10^8 fois plus petit; mais, si l'on évalue R en ohms et I en ampères, on voit que le second membre sera aussi divisé par 10^8, de sorte que la formule est encore exacte, et l'on peut dire que le volt est la force électromotrice qui produit un courant ayant une intensité de 1 ampère dans un circuit dont la résistance est égale à 1 ohm.

Il en sera de même dans la relation (2) qui définit la capacité : si l'on évalue Q en coulombs, au lieu de l'évaluer en unités absolues, le résultat est divisé par 10^{-1} ; mais, si l'on mesure C en farads et E en volts, le second membre est aussi divisé par 10^{-1} ; nous pourrons donc dire que, si un condensateur est tel qu'une charge de 1 coulomb produise entre les armatures une différence de potentiel égale à 1 volt, sa capacité est égale à 1 farad.

Considérons maintenant la loi de Joule (4), on voit que si l'on évalue R en ohms et I en ampères, au lieu de les évaluer en unités absolues, le second membre se trouvera divisé par 10^7, par conséquent la formule ne subsisterait qu'à la condition d'évaluer W avec une unité, qui vaudrait 1 erg multiplié par 10^7, et qui représenterait alors le travail effectué, pendant une seconde, par un courant de 1 ampère traversant un circuit dont la résistance est 1 ohm. Cette unité n'est pas employée, parce qu'en réalité on continue encore, dans la pratique, à évaluer le travail en kilogrammètres; or nous avons vu que le kilogrammètre est égal à un erg multiplié par $10^7 g$, le nombre g étant pris égal à 9,8088. Par conséquent, si l'on divise par g le produit RI^2, on aura en kilogram-

mètres le travail produit, pendant une seconde, par un courant d'intensité I mesuré en ampères passant dans un circuit de résistance R mesurée en ohms.

La loi de Ohm donne

$$RI^2 = EI,$$

donc on peut dire encore que $\frac{EI}{g}$ représente, en kilogrammètres, le travail par seconde dû à une force électromotrice E mesurée en volts, qui produit un courant d'intensité I évaluée en ampères. C'est sous cette dernière forme que l'on applique le plus souvent la loi de Joule.

Les relations que nous avons indiquées ci-dessus montrent comment les unités absolues C.G.S., ou leurs multiples adoptés comme unités pratiques, peuvent se déduire des trois unités fondamentales; donc théoriquement des étalons de ces dernières unités devraient permettre de mesurer toutes les grandeurs. Pratiquement cela ne suffit pas et il serait tout aussi difficile de mesurer les grandeurs électriques dans ces conditions, que de déterminer le poids d'un corps, en n'ayant qu'un mètre à sa disposition.

Il faut donc construire des étalons représentant les unités pratiques et destinés à servir de modèles aux copies employées pour les mesures. Il est à remarquer cependant que, si l'on possède un étalon d'une de ces unités, la résistance par exemple, on pourra facilement évaluer en unités pratiques d'autres grandeurs, telles que l'intensité ou la force électromotrice, dont la mesure se ramène à des comparaisons de résistances.

C'est pour cette raison que le Congrès de 1881 a décidé qu'il y avait lieu seulement de construire un étalon représentant l'unité de résistance; cet étalon fut déterminé par des expériences minutieuses, et le Congrès réuni de nouveau, à cet effet, adopta en 1884, pour l'ohm légal, la résistance, à la température de la glace fondante, d'une colonne de mercure de $1^{m},06$ de longueur et de 1^{mmq} de section.

CHAPITRE DEUXIÈME.

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

Propriétés générales. — Les appareils destinés à la production de l'électricité sont nombreux et varient avec l'usage auquel ils sont destinés; on peut cependant les ranger en trois catégories différentes :

Ce sont d'abord les machines employées principalement pour les expériences d'électrostatique, et qui comprennent les anciennes machines à frottement, ou les appareils multiplicateurs comme l'électrophore, les machines de Holtz, de Thomson, etc.

La deuxième catégorie comprend les piles de toute nature, hydro-électriques et thermo-électriques.

Enfin la troisième catégorie renferme les générateurs fondés sur les phénomènes de l'induction électromagnétique.

Les appareils des deux premières classes sont connus et ne présentent pas, du reste, grand intérêt au point de vue des applications industrielles. Néanmoins, avant d'entreprendre l'étude détaillée des machines d'induction, nous ferons, au sujet des générateurs d'électricité, quelques remarques qui peuvent s'appliquer à tous, sans distinction.

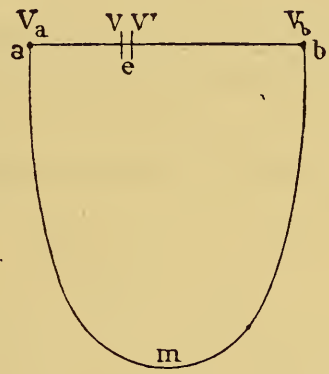
Tout générateur d'électricité a pour but d'utiliser une ou plusieurs forces électromotrices et d'établir, par suite, une différence de potentiel entre deux de ses points qui prennent le nom de *pôles*. Si l'on réunit extérieurement ces pôles par un conducteur, on a un courant qui dure tant que l'on maintient la différence de potentiel entre les deux pôles, ce qui ne peut se faire que par une dépense de travail équivalente au travail produit par le courant.

Nous pouvons figurer un générateur d'électricité par un conducteur réunissant les deux pôles a, b (*fig.* 11) et renfermant en un point e une force électromotrice $E = V - V'$. Si les pôles a et b restent séparés l'un de l'autre, les poten-

tiels V_a, V_b sont respectivement égaux aux potentiels V et V'; mais, si on les réunit par un fil *amb*, les potentiels varient d'une façon continue à partir du point *e*, de sorte qu'en *a* et *b* ils sont différents de V et V'; en un mot, la différence de potentiel aux pôles n'est pas égale à la force électromotrice. Désignons par R la résistance du circuit *amb*, par I l'intensité du courant; pour appliquer la loi de Ohm, il faut considérer le circuit entier *eambe*, de sorte qu'à la résistance R il faut ajouter une quantité *r* représentant la somme des résistances comprises entre *a* et *b* dans le circuit *aeb* : c'est ce qu'on nomme la *résistance intérieure* de l'appareil. On a alors

$$E = (R + r)I = RI + rI.$$

Fig. 11.



Or, si U est la différence de potentiel entre *a* et *b*, on a pour le circuit *amb*

$$U = RI,$$

donc

$$E = U + rI.$$

C'est ainsi qu'on obtient la force électromotrice d'une pile en mesurant, à circuit ouvert, la différence de potentiel aux pôles, au moyen de la balance de Coulomb, ou plutôt de l'électromètre à quadrants, qui n'est qu'un perfectionnement de l'appareil de Coulomb. Si le circuit est fermé, c'est la quantité U qu'on obtient.

Quel que soit le générateur employé, on n'utilise jamais le travail que dans le circuit extérieur. Ce travail est égal à

$$W = RI^2 = \frac{RE^2}{(R+r)^2}.$$

Pour une valeur très grande de R, la résistance r devient négligeable et le travail extérieur tend vers o; mais, pour R = o, ce travail est aussi nul : il y a donc une valeur de R pour laquelle il est maximum.

Pour trouver cette valeur, il suffit d'égaler à o la dérivée de l'expression ci-dessus, prise par rapport à R; on aura alors

$$\frac{(R+r)^2 - 2R(R+r)}{(R+r)^4} = \frac{r^2 - R^2}{(R+r)^4} = 0,$$

d'où

$$r = R,$$

c'est-à-dire que le travail extérieur maximum correspond au cas où la résistance extérieure est égale à la résistance intérieure.

Dans ce cas, le travail extérieur, exprimé en kilogrammètres par seconde, sera

$$\frac{rE^2}{4r^2g} = \frac{E^2}{4gr}.$$

Lois de l'induction. — Nous allons maintenant entreprendre l'étude des machines employées aujourd'hui pour la production de l'électricité; ces machines sont, comme nous l'avons dit, fondées sur l'induction électromagnétique. Nous sommes donc amené à rappeler d'abord les lois qui régissent les phénomènes d'induction.

On sait en quoi consistent les phénomènes d'induction; ils ont été décrits dans ce Recueil même (1) : il nous suffira, par conséquent, de donner les formules qui permettent de les mesurer.

---

(1) *Voir* n° 22 du Mémorial, *Études sur la fabrication des amorces à em-*

Ces formules ont été établies séparément par MM. Helmholtz et William Thomson, en partant des lois d'Ampère et du principe de la conservation de l'énergie.

Considérons un champ magnétique uniforme, d'intensité H et, dans ce champ, un circuit de résistance R parcouru par un courant d'intensité I; soit E la force électromotrice qui produit ce courant; pendant le temps dt, le travail fourni par la source électrique est

$$EI\,dt = RI^2\,dt.$$

Si le circuit R est immobile, le travail est employé uniquement à l'échauffer; mais, d'après les lois d'Ampère, le circuit tend à se déplacer dans le champ magnétique. Si on le laisse obéir à cette action, il effectuera un certain travail et l'énergie correspondante ne peut être fournie que par la source électrique, origine de la force électromotrice E.

Il en résulte que l'intensité I changera; elle prendra une nouvelle valeur $I' < I$, telle que le produit $EI'\,dt$ soit plus grand que $RI'^2\,dt$, la différence représentant le travail dW dû aux actions électromagnétiques; on aura donc

$$(1) \qquad EI'\,dt = RI'^2\,dt + dW.$$

Évaluons maintenant dW; on sait que chaque élément ds du conducteur, faisant avec les lignes de force un angle α, est soumis à une force égale à $HI'\,ds \sin\alpha$, cette force étant dirigée suivant la normale au plan mené par l'élément, parallèlement aux lignes de force.

Considérons une portion de circuit rectiligne $ab = l$ (*fig.* 12) et soit OX une parallèle aux lignes de force, le plan ZOY leur étant perpendiculaire. La force agissant sur ab sera

$$f = HI'\,l \sin\alpha,$$

---

ployer pour mettre le feu aux mines, au moyen de l'électricité de tension, par MM. Rousset et Delambre, capitaines du Génie.

Or, si l'on projette ab sur le plan ZOY, on a

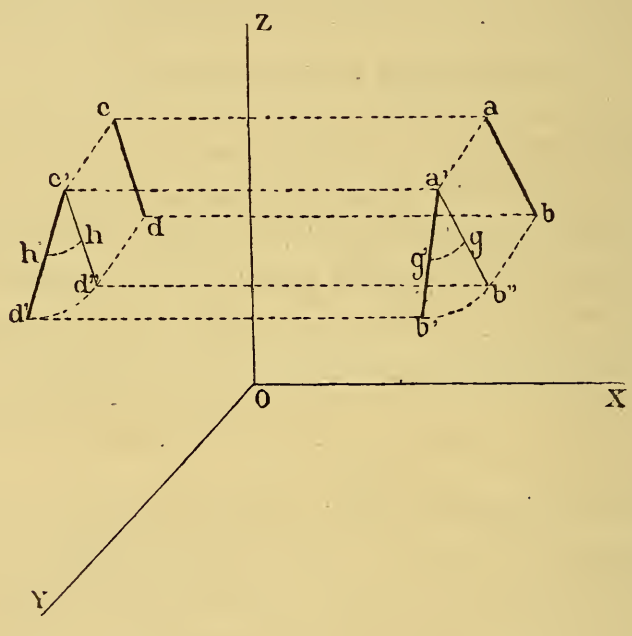
$$l \sin \alpha = cd,$$

donc

$$f = \mathrm{HI}' \times cd.$$

Supposons maintenant qu'au bout du temps dt le conducteur ab soit venu occuper la position infiniment voisine $a'b'$; on peut toujours admettre que ce déplacement élémen-

Fig. 12.



taire s'est fait en deux fois, le conducteur s'étant d'abord transporté parallèlement à lui-même de ab en $a'b''$ et ayant ensuite tourné autour du point a' pour venir en $a'b'$. Nous pourrons donc évaluer séparément les travaux correspondant à chacun de ces déplacements.

Projetons $a'b''$ sur ZOY en $c'd''$, le travail correspondant au premier mouvement est égal au produit de f par la projection de aa' sur f; or cette projection n'est autre chose que la distance dn des plans parallèles $abcd$, $a'b''c'd''$; le travail

sera donc égal à

$$\mathrm{HI}' \times cd \times dn = \mathrm{HI}' \times s_1,$$

s_1 étant la surface du parallélogramme $cdc'd''$.

Projetons maintenant $a'b'$ sur ZOY en $c'd'$ et supposons d'abord que la rotation autour de a' s'effectue dans un plan, la force f est appliquée au point g, milieu de $a'b''$ et ce point g décrit un arc gg' qui se projette en hh' sur le plan ZOY. Le travail de la force f, pendant ce mouvement, est égal au produit de f par la projection de l'arc gg' sur f, projection qui est précisément égale à hh', puisque f est perpendiculaire au plan $a'b''c'd''$. Ce travail sera donc

$$\mathrm{HI}' \times cd \times hh' = \mathrm{HI}' \times s_2,$$

en désignant par s_2 la surface du secteur $d''c'd'$. Si le conducteur $a'b''$ décrivait autour de a' une surface conique au lieu d'un plan, on pourrait toujours décomposer cette surface en éléments plans et le travail serait encore égal à la projection de cette surface sur le plan ZOY multipliée par HI'.

Donc enfin le travail correspondant au déplacement élémentaire de ab en $a'b'$ sera

$$d\mathrm{W} = \mathrm{HI}'(s_1 + s_2) = \mathrm{HI}'s;$$

d'où, en remplaçant $d\mathrm{W}$ par sa valeur dans l'équation (1)

$$\mathrm{EI}'dt = \mathrm{RI}'^2 dt + \mathrm{HI}'s,$$

s étant la projection de la surface décrite par le conducteur rectiligne ab, sur un plan perpendiculaire aux lignes de force.

On en tire

$$\mathrm{I}' = \frac{\mathrm{E} - \dfrac{\mathrm{H}s}{dt}}{\mathrm{R}}.$$

On voit que le mouvement diminue la force électromotrice dans le circuit considéré, c'est-à-dire qu'il agit comme s'il

donnait naissance à une force électromotrice inverse de E dont la valeur serait

$$e = \frac{Hs}{dt}.$$

On donne à cette dernière le nom de *force électromotrice d'induction;* on voit qu'elle est indépendante de E : elle sera donc toujours la même, quelle que soit la valeur de E. Il faut remarquer cependant que le raisonnement qui précède ne saurait subsister avec $E = 0$; mais on peut dire qu'en réalité il n'existe pas de circuit fermé qui ne soit le siège de forces électromotrices; il suffit, par exemple, d'une variation de température en un de ses points pour donner naissance à un courant qui, si faible qu'il soit, permettra à l'induction de se produire; de sorte que, pratiquement, la force électromotrice d'induction pourra se développer dans un circuit à l'état neutre, et l'on sait que c'est sous cette forme que les phénomènes d'induction furent découverts par Faraday.

La force électromotrice étant égale à e, l'intensité du courant d'induction sera

$$i = \frac{Hs}{R\,dt}.$$

La quantité d'électricité mise en mouvement pendant le déplacement sera alors

$$Q = i\,dt = \frac{Hs}{R}.$$

On voit qu'en somme la quantité d'électricité mise en mouvement pendant un déplacement donné du circuit est indépendante du temps pendant lequel ce déplacement s'effectue, tandis que la force électromotrice et l'intensité du courant sont en raison inverse de ce temps. Dans le cas où la projection s croît proportionnellement au temps, e et i sont proportionnelles à la vitesse de déplacement.

On voit également que la projection s sera d'autant plus grande, que l'élément ab fera, avec les lignes de force, un

angle plus voisin de 90°; en même temps, la force électromotrice e augmente avec H; on exprime quelquefois ce résultat en employant les notations de Faraday et en disant que la force électromotrice d'induction est d'autant plus grande que le circuit considéré coupe, dans son mouvement, un plus grand nombre de lignes de force.

Il faut encore signaler, à propos de l'induction, les phénomènes d'extra-courants découverts par Faraday et dont il est parlé dans le Mémoire déjà cité du n° 22 du *Mémorial*. Lorsque l'on ferme un circuit qui contient une force électromotrice, le courant ne s'établit pas instantanément, il y a une période variable, pendant laquelle le courant atteint successivement toutes les parties du conducteur. Or les portions parcourues les premières détermineront dans les autres des effets d'induction qui agiront pour diminuer l'intensité du courant et nécessiteront une dépense de travail supplémentaire; l'énergie ainsi dépensée pour l'extra-courant de fermeture reste à l'état d'énergie potentielle, tant que le circuit est fermé, et est restituée dans l'extra-courant de rupture.

Premières machines d'induction. — Ce sont ces principes qui ont été appliqués pour la construction des machines électriques; on voit en effet que l'on peut, grâce aux phénomènes d'induction, transformer le travail mécanique en électricité; il suffit, pour cela, de déplacer un circuit ou une portion de circuit dans un champ magnétique. Dès que les expériences de Faraday furent connues, cette idée fut mise à exécution, d'abord dans la machine de Pixii, qui fut présentée à l'Académie des Sciences de Paris, en septembre 1832, par Hachette et fonctionna la même année au cours d'Ampère [1].

L'année suivante, Ritchie et Saxton, Clarke construisirent

---

[1] *Voir* le journal la *Lumière électrique,* t. VII, p. 5. *Histoire des machines magnéto et dynamo-électriques,* par A. Guérout.

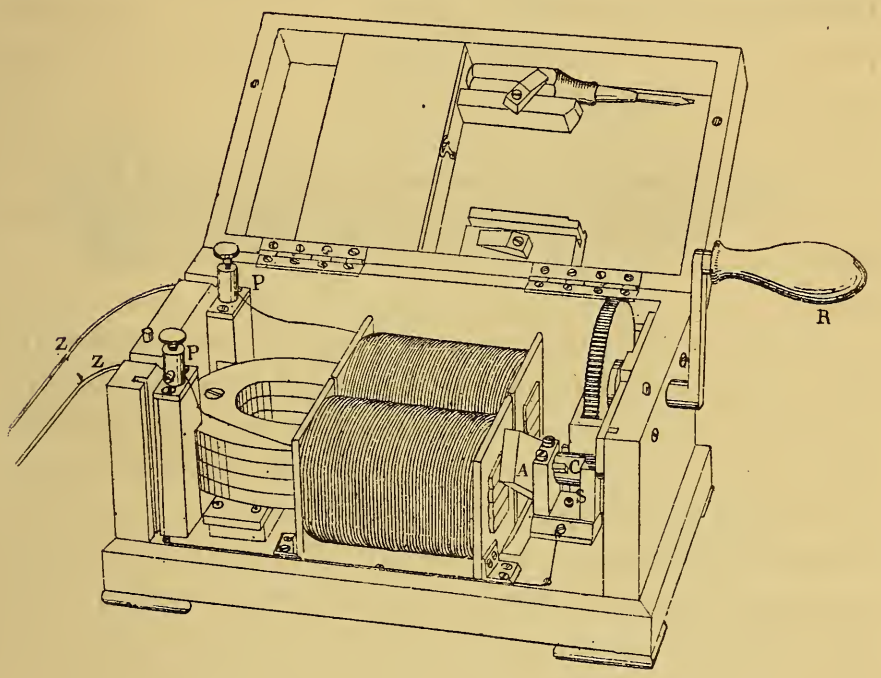
des machines analogues; la machine de Clarke est une des plus connues et se trouve décrite dans tous les Traités de Physique. Dans ces appareils, le champ magnétique est produit par un aimant inducteur en fer à cheval, mobile comme dans la machine de Pixii, ou fixe comme dans celle de Clarke. Les circuits induits sont constitués par des bobines cylindriques enroulées sur des noyaux de fer. L'expérience avait montré que ces noyaux de fer augmentaient notablement la puissance des effets, ce qu'il est facile de comprendre, puisqu'ils ont pour résultat d'augmenter l'intensité du champ magnétique dans leur voisinage. Il est à remarquer qu'à chaque demi-révolution, le sens de l'induction change dans les bobines induites; par conséquent, si les pôles de la machine sont toujours en communication avec les mêmes extrémités du circuit induit, le circuit extérieur est parcouru par une succession de courants dirigés alternativement dans un sens et dans l'autre. Si l'on veut que ces courants soient tous de même sens, on emploie un commutateur qui intervertit les communications des pôles avec les extrémités du circuit induit, au moment où le sens de l'induction change dans celui-ci.

Les dispositions que nous venons de citer ont été variées de bien des manières et il est clair que toute modification du champ magnétique dans le voisinage d'un circuit produira des courants induits dans ce circuit. C'est ainsi que dans la machine de Page dont la *fig.* 13 représente le modèle construit pour la mise du feu aux mines (petite pyrothèque), l'induction est produite par le déplacement d'un morceau de fer doux A devant les pôles d'un aimant, les bobines induites étant enroulées sur les branches de l'aimant. L'exploseur Bréguet présente une disposition analogue; enfin c'est à la même cause que sont dus les courants produits dans le téléphone.

Tous ces appareils n'avaient que des dimensions relativement restreintes; la première machine ayant un caractère industriel fut employée en 1863 pour l'éclairage des phares

de la Hève et du cap Gris-Nez : c'était la machine de la Compagnie l'Alliance qui, construite par Nollet en 1850, avait été perfectionnée par Van Malderen. Ce n'est autre chose qu'une machine de Clarke à 40 aimants inducteurs et par conséquent 80 bobines induites; dans le principe, les courants étaient redressés, on avait dû alors employer un

Fig. 13. — Machine de Page.

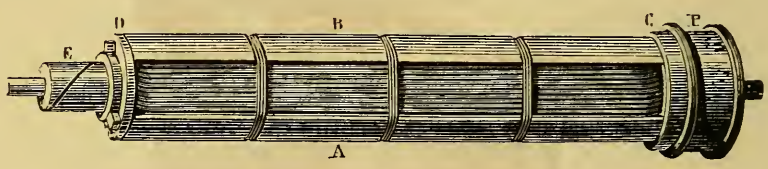


commutateur assez compliqué qui fonctionnait mal. Le principal perfectionnement de Van Malderen fut la suppression de ce commutateur; les courants étaient alors laissés alternatifs dans le circuit extérieur, disposition qui ne conviendrait pas pour le transport de la force, mais qui ne présente pas d'inconvénient pour l'éclairage.

Une amélioration importante, apportée par Siemens à la construction des machines, fut l'emploi de la bobine allongée qui porte son nom ; cette bobine, représentée *fig.* 14, se compose, comme on le sait, d'une âme en fer dont la section est

un double T. Le fil isolé qui forme le circuit induit est enroulé longitudinalement sur cette âme et, dans la première machine construite par Siemens, la bobine tournait entre les pôles d'une série d'aimants en fer à cheval, ayant leurs plans parallèles. On voit, sans qu'il soit nécessaire d'insister, qu'avec cette disposition, les spires induites se meuvent de manière à couper un grand nombre de lignes de force et que, par conséquent, on utilise mieux le champ magnétique qu'avec les dispositions précédentes.

Fig. 14. — Bobine Siemens (1).



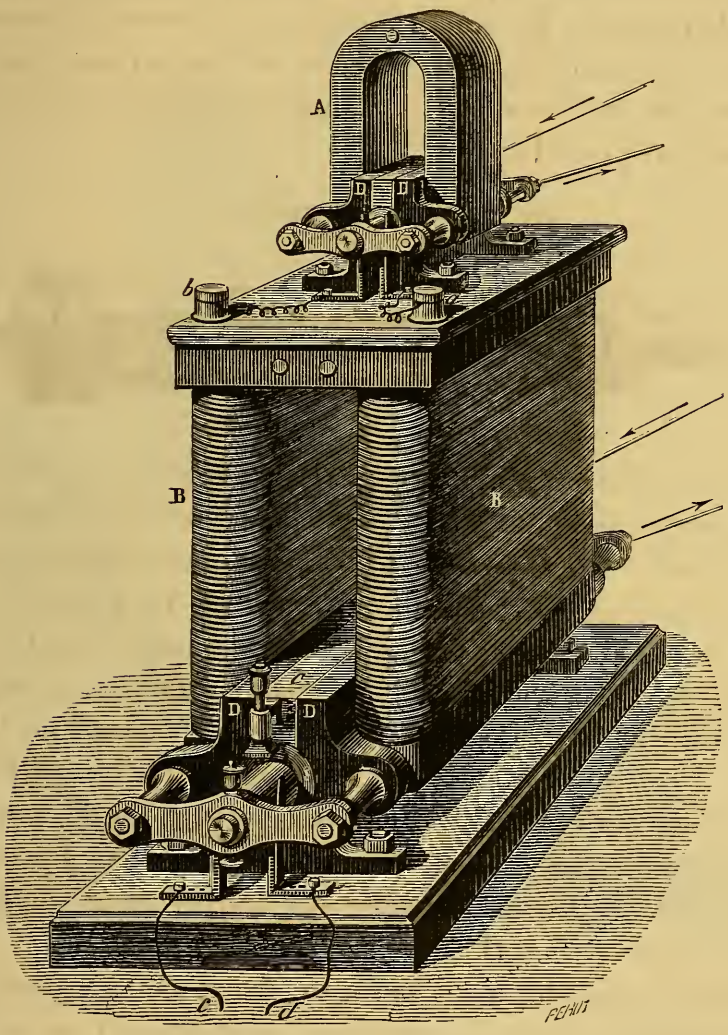
Toutes ces machines rentrent dans la catégorie des machines dites *magnéto-électriques;* on désigne ainsi les machines d'induction dans lesquelles le champ magnétique est produit par un ou plusieurs aimants permanents. La puissance des effets obtenus avec les électro-aimants conduisit bientôt à les employer pour former le champ magnétique des machines. Le premier appareil construit ainsi est la machine de Wilde (1864) (*fig.* 15), dans laquelle les inducteurs sont formés d'un électro-aimant BB à bobines plates excité par une petite machine magnéto-électrique Siemens A. La bobine induite est une bobine Siemens qui tourne entre deux épanouissements en fer D′, D′.

Enfin en 1866, les machines à électro-aimants ou machines *dynamo-électriques* reçurent une modification importante dont le principe paraît avoir été découvert séparément par Varley, Werner Siemens et Wheatstone; cette modification,

(1) Jamin et Bouty, *Cours de Physique de l'École Polytechnique,* t. IV, 3e fascicule. Gauthier-Villars, 1883.

réalisée par le constructeur Ladd, consiste à supprimer la machine excitatrice et à produire l'aimantation des électro-aimants par le courant même de la machine. Cette disposition

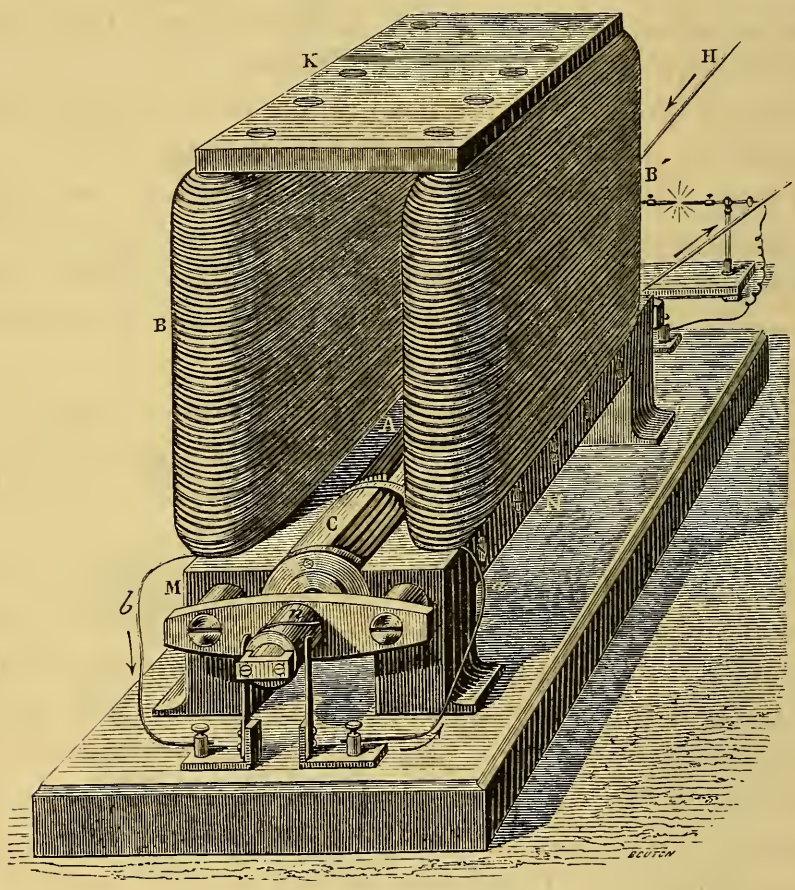
Fig. 15. — Machine de Wilde (*Jamin et Bouty*).



repose sur ce fait que les noyaux de fer des électro-aimants inducteurs ne sont jamais exempts de magnétisme qui provient de l'action terrestre, du travail de l'atelier ou de toute autre cause. Bref il existe, de sorte qu'au moment de la mise en marche, le circuit induit se meut dans un champ magné-

tique, très faible à la vérité, mais en général suffisant pour produire un courant; ce courant passant dans le fil des électro-aimants augmente leur magnétisme, celui-ci à son tour augmente l'intensité du courant, et ainsi de suite, jusqu'à ce que le régime permanent soit établi. La *fig.* 16 représente une

Fig. 16. — Machine de Ladd.



machine dynamo-électrique ainsi disposée; dans cette machine, la bobine induite, qui est toujours une bobine Siemens, se compose en réalité de deux bobines A et C portant deux circuits distincts; le circuit C sert uniquement à actionner par les fils *a*, *b* les inducteurs B, tandis que A communique avec le circuit extérieur.

Cette disposition n'est pas celle qui est employée le plus

souvent aujourd'hui; on n'a ordinairement qu'un seul circuit contenant l'un au bout de l'autre ou, comme on le dit, disposés en série : le circuit induit, le circuit inducteur et le circuit extérieur.

La machine de Ladd excita vivement l'attention des savants à l'Exposition universelle de 1867, où on l'employa à produire la lumière. Néanmoins elle reçut peu d'applications; cela tient en partie à ce qu'il fallait lui donner une vitesse considérable et qu'elle s'échauffait rapidement.

On sait que des essais furent tentés pour l'emploi d'une machine de ce genre à la mise du feu aux mines ([1]).

Il nous reste enfin, pour terminer cette sorte d'historique des machines électriques, à parler d'un dernier appareil, c'est la machine de Pacinotti dont la construction remonte à 1861 et dont la première description a été donnée en 1864 dans *Il nuovo Cimento*.

L'appareil de Pacinotti, représenté dans la *fig.* 17, est important au point de vue de la disposition particulière du circuit induit, car c'est cette disposition qui se retrouve dans les machines industrielles actuelles.

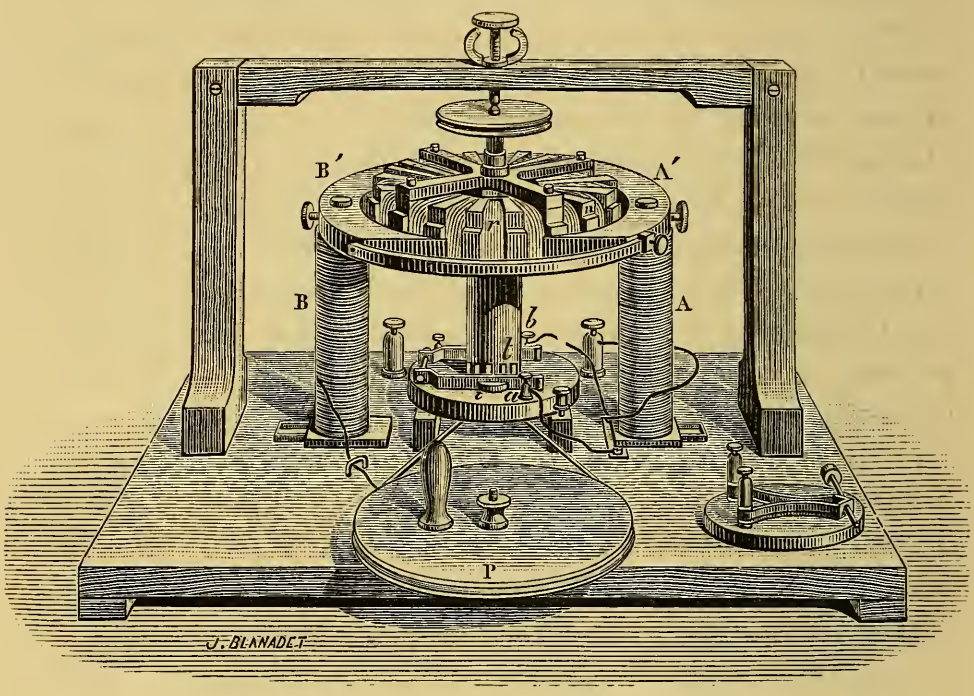
La partie mobile, dans laquelle se développent les courants d'induction, se compose d'un anneau en fer portant seize dents; dans les intervalles de ces dents sont enroulées des bobines qui sont séparées les unes des autres par les saillies des dents et par de petits prismes triangulaires en bois fixés sur chaque saillie, de part et d'autre de l'anneau. Cet anneau se meut dans le champ magnétique formé par deux électro-aimants A, B, surmontés de deux pièces polaires en fer doux A′ et B′ ([2]).

([1]) *Voir*, dans le n° 22 du *Mémorial*, le Mémoire du capitaine Richard (Joachim), *Sur une machine électrique à basse tension.*

([2]) Dans la figure, les communications sont établies de manière à placer les électro-aimants dans le circuit, mais Pacinotti n'employait cette disposition que lorsque son appareil fonctionnait comme moteur, sous l'action

Les trente-deux fils formant les extrémités des seize bobines descendent le long de l'axe de rotation et aboutissent à un commutateur, au sujet duquel nous reproduisons la description donnée par Pacinotti dans son Mémoire.

Fig. 17. — Machine de Pacinotti (*Jamin et Bouty*).



« Ce commutateur consiste en une rondelle ou petit cylindre de bois ayant au bord de sa circonférence deux rangées de mortaises dans lesquelles sont encastrés seize morceaux de laiton, huit dans les mortaises supérieures, huit dans les inférieures, les premiers alternant avec les seconds, tous concentriques au cylindre de bois sur lequel ils font légèrement saillie et dont l'épaisseur sépare une

---

d'une pile placée dans le circuit extérieur. Lorsqu'il se servait de l'appareil comme générateur d'électricité, les électro-aimants étaient excités à part, au moyen d'une pile. Pacinotti ne paraît donc pas avoir vu le principe de l'excitation propre des machines dynamo-électriques.

rangée de l'autre. Chacun de ces morceaux de laiton est soudé aux deux bouts de fil qui correspondent à deux bobines consécutives, de sorte que toutes les bobines communiquent entre elles, chacune d'elles étant reliée à la suivante par un conducteur dont fait partie un des morceaux de laiton du commutateur. »

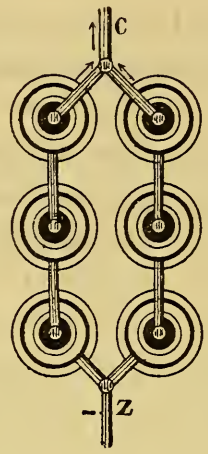
On voit, par cette description, que les seize bobines de l'anneau Pacinotti forment un circuit fermé; mettons l'anneau en mouvement, il se produira des courants induits dans chaque bobine et il est facile de se rendre compte que si l'on mène par l'axe de rotation un plan perpendiculaire à la ligne des pôles, les huit bobines situées d'un même côté de ce plan seront le siège de courants dirigés dans un certain sens, tandis que les huit bobines situées de l'autre côté seront parcourues par des courants de sens contraire, et en outre, par suite de la symétrie de l'appareil, la somme des forces électromotrices sera nulle. Enfin, si le mouvement est uniforme, les bobines se succéderont les unes aux autres, et les courants, en se produisant successivement dans chaque bobine, occuperont, pour ainsi dire, toujours la même position dans l'espace.

Il en résulte que les seize bobines peuvent être considérées comme 16 éléments de pile réunis en deux groupes de 8 éléments associés en tension dans chaque groupe, les deux groupes étant réunis en quantité, c'est-à-dire opposés par leurs pôles de mêmes noms. C'est la disposition représentée (*fig.* 18) pour deux groupes de 3 éléments. Si les deux pôles C et Z sont isolés l'un de l'autre, on n'aura aucun courant, mais, si on les réunit par un conducteur, on aura un courant dont on peut calculer l'intensité, connaissant la force électromotrice et la résistance intérieure de chaque élément.

Dans la machine Pacinotti, les deux points C et Z de la *fig.* 18 sont représentés par les touches de laiton du commutateur qui se trouvent dans le plan de symétrie, c'est-à-dire que si l'on place dans ce plan deux galets *i* (*fig.* 17) sur lesquels viennent successivement frotter les touches, il y aura

constamment entre ces galets une certaine différence de potentiel; on pourra donc les considérer comme les pôles de l'appareil et le circuit extérieur qui les réunira sera parcouru par un courant. C'est ce que l'expérience vérifie.

Fig. 18.



Cette machine resta oubliée dans le cabinet de Physique de l'Université de Pise, et c'est seulement en 1872 que les générateurs à induction entrèrent dans la pratique industrielle, lorsque Gramme eut découvert sa machine qui reproduit les dispositions principales de celle de Pacinotti.

Classification des machines. — Les machines électriques dont la machine Gramme a été le point de départ sont très nombreuses et, à quelques exceptions près, elles se valent toutes. Les unes ne renferment que des modifications de forme destinées à justifier un brevet nouveau, les autres, pour éviter certains inconvénients, perdent certains avantages, de sorte qu'il y a compensation. Parmi ces diverses tentatives, quelques-unes cependant présentent de l'intérêt, au moins au point de vue théorique.

Nous ne prétendons pas décrire en détail toutes les dispositions imaginées par les inventeurs; néanmoins, pour faire avec méthode un examen, même rapide, des principales

d'entre elles, il est nécessaire d'établir une classification des machines électriques. Il est clair d'ailleurs que suivant le point de vue auquel on se placera, on pourra grouper les machines de telle ou telle manière. La classification que nous adoptons ici n'a donc rien d'absolu.

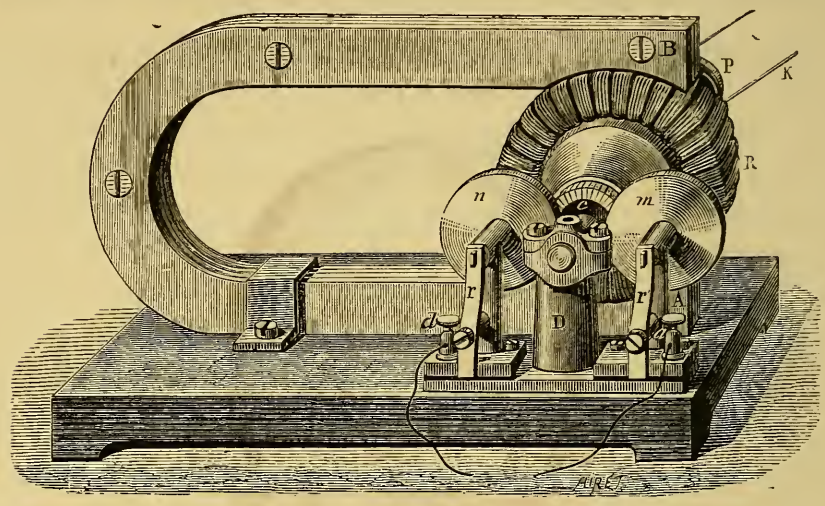
Nous distinguerons d'abord deux catégories comprenant, d'une part les machines dites à *courants continus* représentées par l'appareil de Pacinotti ou la machine de Clarke munie de son commutateur, et d'autre part les machines à *courants alternatifs*, comme la machine de Clarke sans commutateur (machine de Skidmore), ou la machine de l'Alliance.

Dans chacune de ces catégories, les machines seront classées, suivant la nature de leurs inducteurs, en magnéto-électriques ou dynamo-électriques. Enfin chacune de ces classes pourra se subdiviser en plusieurs autres, d'après la disposition donnée aux bobines de l'induit.

Machines à courants continus, magnéto-électriques. — Nous citerons en premier lieu la machine magnéto-électrique de Gramme, désignée ordinairement sous le nom de modèle de laboratoire. Dans cette machine (*fig.* 19) l'inducteur se compose d'un aimant en fer à cheval entre les pôles duquel tourne un induit représenté à part (*fig.* 20). Celui-ci est formé de bobines accolées B et enroulées sur un même anneau de fer doux A formé lui-même avec du fil de fer; l'enroulement est donc parallèle à l'axe de rotation. Les bobines sont réunies, comme dans l'anneau Pacinotti, de manière à constituer un circuit continu et fermé, c'est-à-dire que le fil sortant de l'une d'elles est relié au fil entrant de la suivante par l'intermédiaire d'une lame métallique R; ces lames, repliées en équerre, sont isolées les unes des autres et disposées suivant les génératrices d'un cylindre concentrique à l'axe. Deux frotteurs *m*, *n* (*fig.* 19) représentent les pôles de l'appareil et il suffit de se reporter à la description que nous avons donnée de l'appareil Pacinotti pour en comprendre sommairement le fonctionnement.

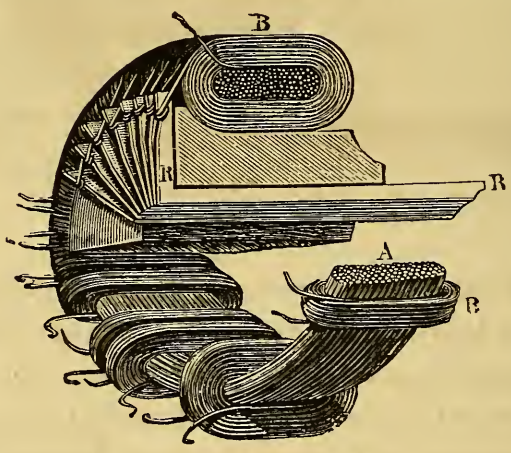
Dans la machine Gramme, l'organe destiné à recueillir les courants, qui n'est pas à proprement parler un commutateur, a reçu le nom de *collecteur*.

Fig. 19. — Machine magnéto-électrique de Gramme, modèle de laboratoire.



La *fig.* 21 représente la machine Gramme de laboratoire, telle qu'on la construit aujourd'hui; l'induit est formé par un

Fig. 20. — Anneau Gramme (*Jamin et Bouty*).

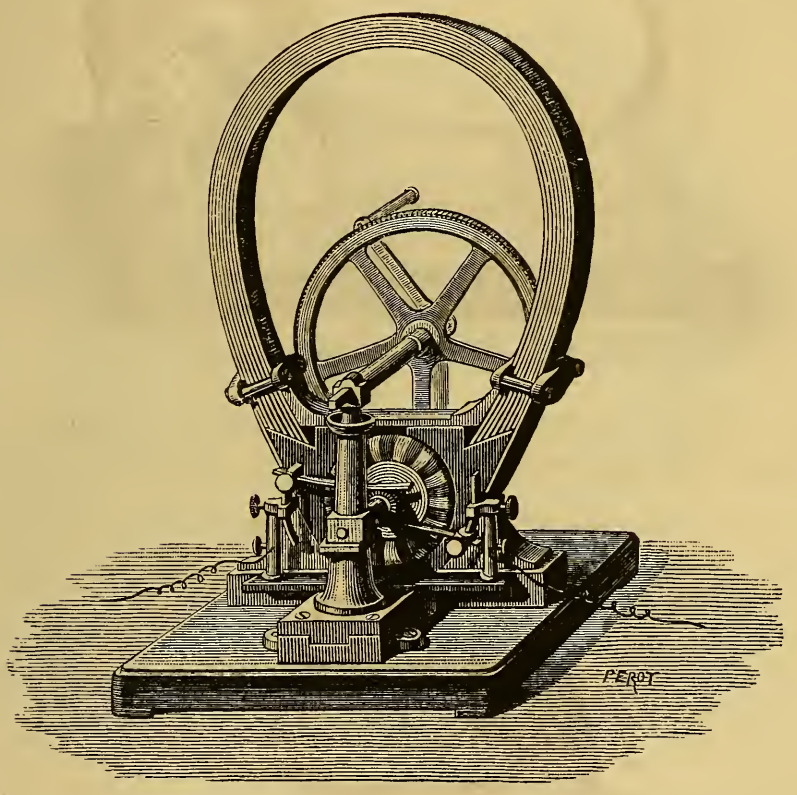


aimant système Jamin, composé de lames d'acier aimantées à saturation; ces lames sont fixées à des masses de fer formant deux pôles épanouis et présentant entre elles une cavité cylindrique dans laquelle se meut l'anneau induit. Enfin les

galets servant de frotteurs sont remplacés par des balais métalliques.

Comme appareils de grande puissance, les machines magnéto-électriques à courants continus sont peu employées. Cela tient principalement à ce que pour produire un champ

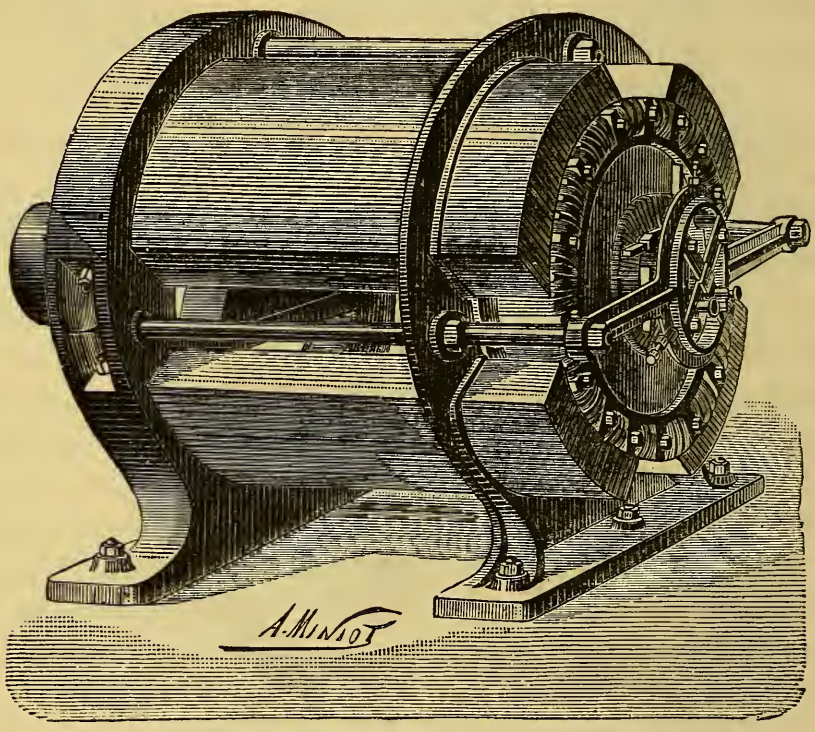
Fig. 21. — Machine Gramme de laboratoire, à aimant Jamin (*Jamin et Bouty*).



magnétique d'intensité donnée, les aimants permanents sont beaucoup plus lourds que les électro-aimants. Nous citerons toutefois comme machine de cette espèce la machine de Méritens représentée *fig.* 22. Sur deux bâtis circulaires formant les extrémités de la machine sont disposés quatre faisceaux aimantés composés chacun de soixante-quatre lames d'acier de $0^m,67$ de longueur. Ces faisceaux épousent la forme des bâtis circulaires, de manière que tout l'appareil a l'aspect

d'un cylindre présentant quatre ouvertures longitudinales. Les pôles de ces inducteurs, considérés à une même extrémité de la machine, sont alternativement nord et sud. Dans le cercle formé par ces pôles tourne un anneau induit dont la construction rappelle celle de l'anneau Pacinotti, c'est-à-dire que le fil est enroulé sur un noyau en fer présentant des

Fig. 22. — Machine de Méritens à courants continus (la *Lumière électrique*).



saillies qui séparent les différentes bobines; celles-ci sont reliées à un collecteur Gramme et les courants sont recueillis au moyen de balais. Mais il faut remarquer que la disposition ici n'est plus la même que dans la machine précédente. En effet, dans la machine Gramme, les frotteurs sont disposés de telle sorte que leurs points de contact soient aux extrémités du diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles ; ce diamètre, ou plutôt le plan mené par l'axe et ce diamètre sépare les deux portions de l'anneau qui sont parcourues par des cou-

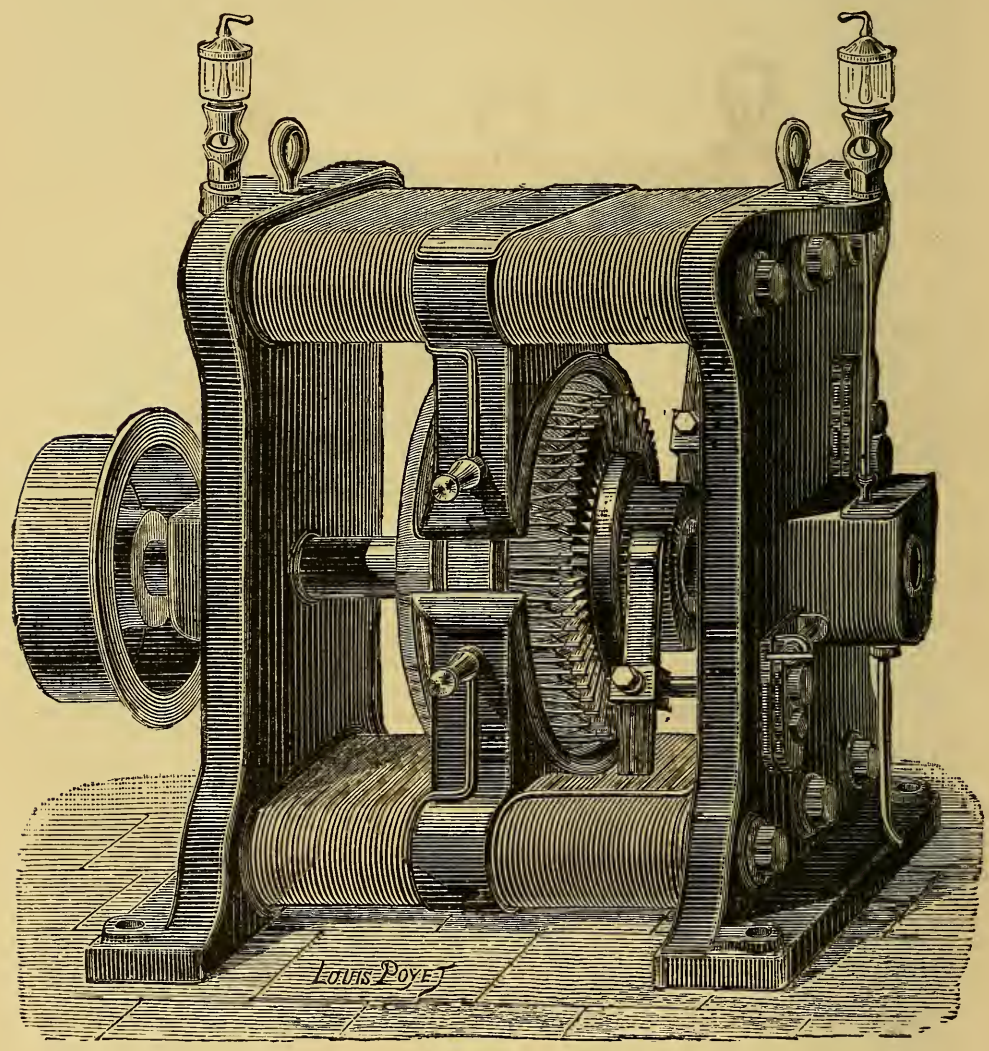
rants de sens contraires ; on le désigne ordinairement sous le nom de *ligne neutre*. Dans la machine de Méritens, il y a deux lignes neutres rectangulaires, puisqu'il y a quatre pôles ; il en résulte qu'il faudra employer quatre balais placés aux extrémités de ces deux diamètres. L'appareil se présente donc comme une machine double ayant deux pôles positifs et deux pôles négatifs ; il est clair alors que l'on aura ainsi deux courants que l'on pourra utiliser dans deux circuits distincts ou réunir ensemble, comme on le ferait avec deux éléments de pile.

Machines à courants continus, dynamo-électriques. — Comme pour les machines de la précédente catégorie, nous commencerons la description des machines dynamo-électriques par la machine Gramme (*fig.* 23). L'induit est constitué par un anneau semblable à celui de la machine magnéto-électrique ; l'inducteur est formé par deux électro-aimants à deux branches opposées par les pôles de mêmes noms sur des masses de fer doux. Celles-ci constituent des pôles conséquents entre lesquels tourne l'anneau induit. Les flasques en fonte du bâti servent de culasses aux électro-aimants dont ils ferment le circuit magnétique. La machine étant dynamo-électrique, les inducteurs sont excités par le courant même produit dans l'anneau et sont intercalés en série dans le circuit. La machine représentée *fig.* 23 est le type D qui est employé pour l'éclairage des phares ; dans le modèle A, dit *type d'atelier,* représenté *fig.* 24, les inducteurs sont cylindriques au lieu d'être plats et la machine est plus petite.

Parmi les nombreux modèles créés par M. Gramme, nous citerons encore la machine *octogone* qui avait été construite spécialement en vue du transport de la force (*fig.* 25). C'est, comme on le voit, une machine à quatre pôles qui nécessitent par conséquent quatre balais ; ceux-ci fournissent deux courants distincts qui peuvent être utilisés ensemble ou séparément. Cette machine présente cet avantage que le champ

magnétique y est créé, non plus par des pôles conséquents, comme dans la machine précédente, mais par des pôles ordinaires, disposition qui, à dépense égale, semble donner un

Fig. 23. — Machine dynamo-électrique de Gramme (la *Lumière électrique*).

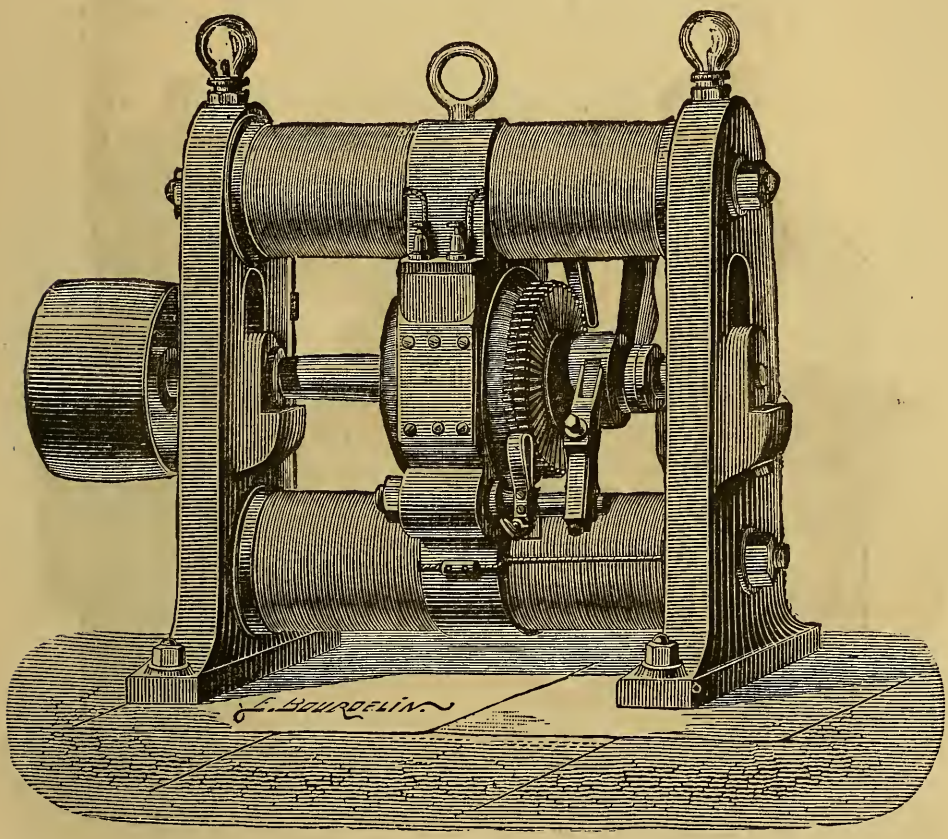


champ plus intense et plus régulier. La machine octogone a toutefois le défaut de présenter des épanouissements polaires trop faibles.

En se basant sur la nécessité de produire un champ magnétique aussi intense que possible avec un poids de fer et de

cuivre donné et pour une dépense de travail donnée, M. Marcel Deprez a construit une machine (*fig.* 26) dans laquelle un anneau Gramme ordinaire tourne entre deux pôles de noms contraires munis de forts épanouissements en fer. Chacun

Fig. 24. — Machine Gramme, type d'atelier (*Jamin et Bouty*).

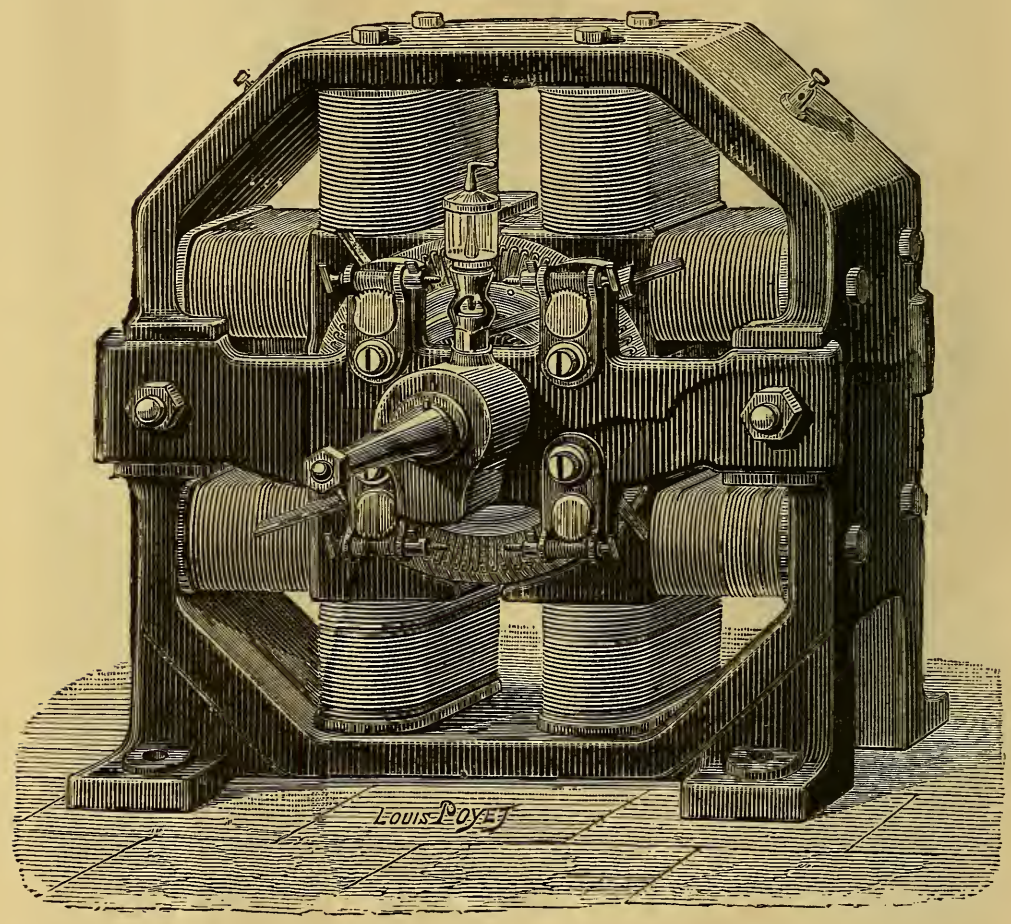


de ces inducteurs appartient à un électro-aimant en fer à cheval, de sorte qu'on a, en réalité, comme inducteurs, deux électro-aimants en fer à cheval, opposés par leurs pôles de noms contraires. Cette disposition nécessite l'emploi de deux anneaux qui sont montés sur un même axe. On pourrait n'avoir qu'un seul collecteur pour les deux anneaux; on a préféré en placer deux, afin de pouvoir utiliser séparément les courants fournis par les deux induits.

La machine Gramme a donné naissance, surtout à l'étranger,

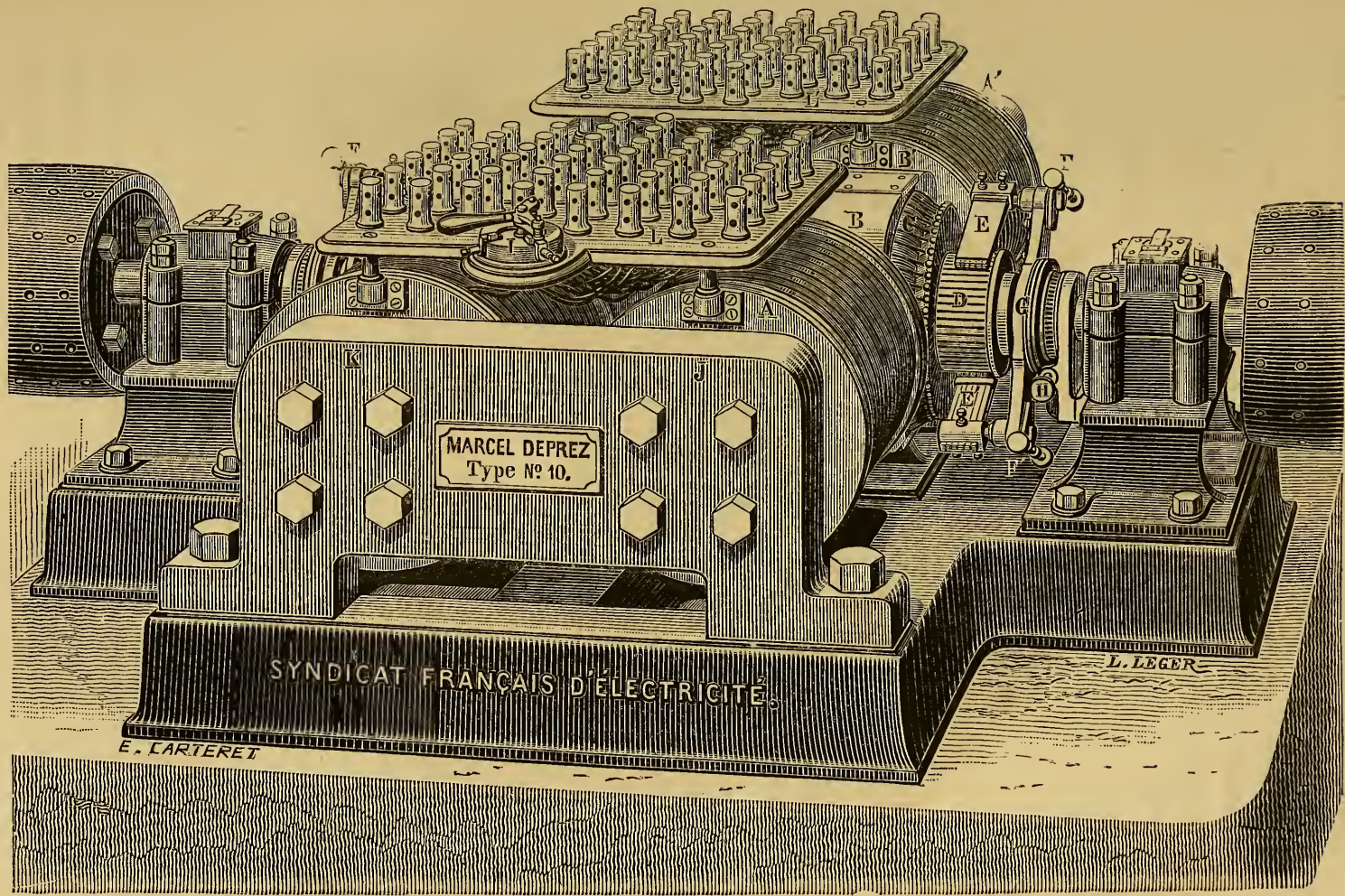
à une foule d'imitations qui ne présentent pas en général de particularités bien intéressantes; nous citerons donc seulement pour mémoire la machine *Egger* et *Kremenesky*, les machines *Edelmann, Einstein,* dont les inducteurs présentent une épaisseur de fil plus grande vers les pôles; les

Fig. 25. — Machine Gramme octogone (la *Lumière électrique*).



machines *Van der Poele, Richter,* dans lesquelles on a laissé un intervalle entre les bobines de l'induit, afin de faciliter la circulation de l'air et diminuer l'échauffement; les machines *Mac Tighe, Hochausen,* dans lesquelles on a cherché à simplifier la construction de l'anneau en formant le noyau au moyen d'un cylindre portant une fente longitudinale qui

Fig. 26. — Machine Marcel Deprez (la *Lumière électrique*).



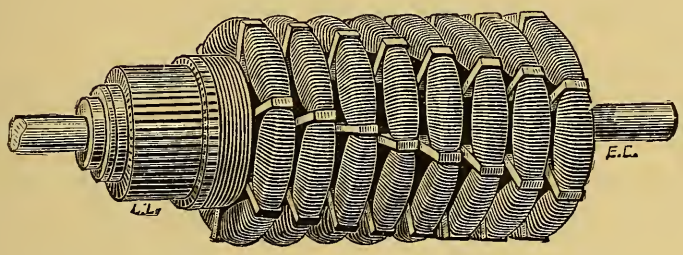
permet d'introduire les bobines toutes faites et que l'on ferme après coup.

Malgré les bons résultats obtenus avec l'anneau Gramme, certains constructeurs n'ont pas renoncé pour cela à employer l'anneau Pacinotti qui n'est pas sans présenter aussi certains avantages. En effet, si d'une part les bobines sont jointives, comme dans l'anneau Gramme, on peut en placer un plus grand nombre, ce qui augmente le nombre des courants qui s'ajoutent; mais, d'autre part, si les bobines sont séparées par des saillies en fer, comme dans l'anneau Pacinotti, le noyau se trouve rapproché des inducteurs et le nombre des lignes de force coupées par les bobines augmente. Ajoutons que les expériences de M. Sylvanus Thompson ont paru montrer qu'il y avait avantage à employer l'anneau Pacinotti. Quoi qu'il en soit, cette disposition a été conservée dans plusieurs machines, parmi lesquelles nous citerons la machine *Maxim*. Les inducteurs sont des électro-aimants à points conséquents comme dans la machine Gramme; leur disposition est la même que celle indiquée plus loin pour la machine Siemens. L'induit est un anneau Gramme allongé; il se compose d'une série de plaques en tôle de fer, découpées en couronnes et présentant quinze saillies sur la circonférence extérieure. En les superposant, on forme un cylindre creux dont la surface intérieure est lisse et dont la surface extérieure porte quinze cannelures. Le fil est alors enroulé comme dans l'anneau Gramme et de manière à remplir les cannelures. Le collecteur est le collecteur Gramme ordinaire.

Parmi les machines dans lesquelles on s'est préoccupé de rapprocher des inducteurs le noyau de fer de l'induit, il faut encore citer la machine *Bürgin* dont la *fig.* 27 montre l'induit seul. Pour l'obtenir, on forme avec des fils de fer un noyau qui, au lieu d'être circulaire, est hexagonal; sur chaque côté de l'hexagone, on enroule du fil de cuivre isolé et l'on obtient ainsi six bobines qui ne doivent pas dépasser le cercle circonscrit à l'hexagone. Les sommets sont laissés à découvert

et se meuvent très près des inducteurs. Un anneau à six bobines ainsi constitué serait trop faible ; aussi réunit-on sur le même arbre huit de ces anneaux, en ayant soin de placer les sommets des hexagones suivant des hélices. Cette disposition a pour but de diminuer les variations d'intensité du courant. On a donc en tout quarante-huit bobines qui sont alors reliées aux quarante-huit lames d'un collecteur. Quant aux inducteurs, ce sont des électro-aimants ordinaires qui ne présentent rien de particulier.

Fig. 27. — Induit Bürgin (la *Lumière électrique*).



Si, dans une machine comme celles que nous venons de décrire, on considère seulement l'action des inducteurs sur une des spires de l'anneau induit, sans tenir compte de la présence du noyau en fer, il est facile de voir que, les courants étant dirigés dans le même sens pour le fil extérieur et le fil intérieur de cette spire, on ne recueillerait pour la spire entière que la différence des deux actions, c'est-à-dire très peu de chose, cette différence provenant uniquement de ce fait que les deux fils considérés ne sont pas tout à fait à la même distance des inducteurs. D'après certaines théories, le noyau en fer de l'anneau servirait uniquement d'écran, pour empêcher l'action nuisible des inducteurs sur les fils intérieurs, mais la partie intérieure de l'anneau Gramme n'en agirait pas moins pour augmenter sans profit la résistance totale du circuit. Sans nous prononcer, pour le moment, sur la valeur de cette explication, nous citerons seulement les machines créées dans cet ordre d'idées et dans lesquelles on a

cherché à mieux utiliser les parties internes de l'anneau Gramme.

Dans la machine *Fein*, dont la disposition générale est celle de la machine Gramme, l'anneau est fixé par une de ses bases à un disque calé sur l'arbre; à l'autre extrémité, les épanouissements polaires des inducteurs sont recourbés en forme d'entonnoir, de manière à pénétrer dans l'intérieur de l'anneau.

Dans la machine *Schwerd* et *Scharnweber*, l'anneau est porté en son milieu par une étoile métallique sur laquelle il déborde par les deux bouts et les épanouissements des inducteurs pénètrent par les deux extrémités à l'intérieur de l'anneau.

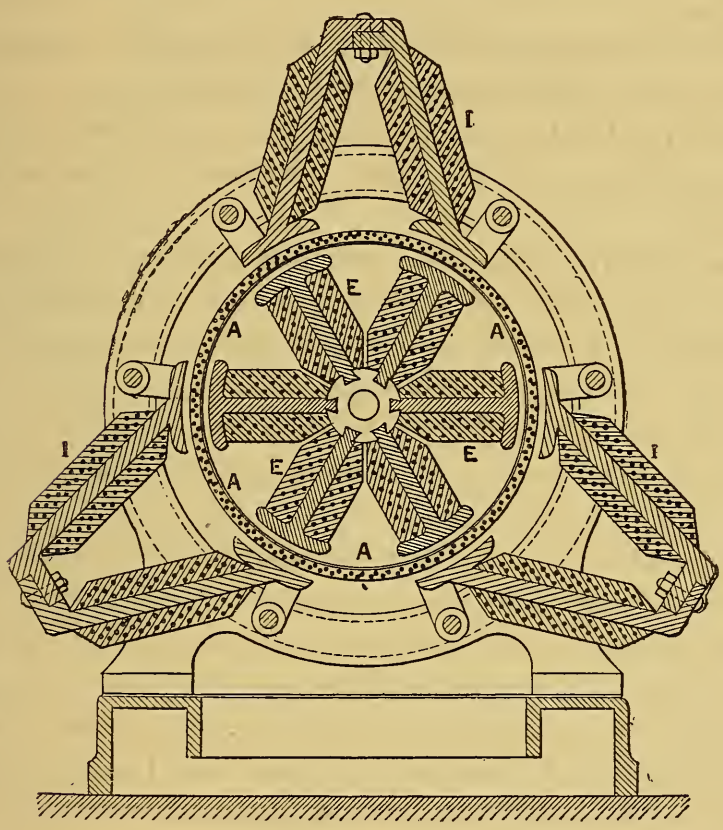
Dans d'autres appareils, comme la machine *Jurgensen* et *Lorenz*, on a placé un deuxième système d'inducteurs dans l'intérieur de l'anneau; ce sont des électro-aimants plats, un peu plus courts que l'induit qui sont disposés en croix. Les pôles de même nom étant réunis par une pièce en fer doux, on a ainsi deux pôles intérieurs qui sont en face des pôles extérieurs de même nom.

Indépendamment de toute considération théorique, toutes ces dispositions présentent toujours l'inconvénient d'augmenter beaucoup les difficultés de construction, en empêchant l'anneau d'être relié solidement à l'axe de rotation.

Nous citerons cependant encore, comme machines à inducteurs intérieurs, la machine *Elphinston* et *Vincent* qui présente ceci de particulier que son induit ne renferme pas de fer; cette machine est représentée en coupe (*fig.* 28). L'inducteur comprend, comme on le voit, six pôles extérieurs et six pôles intérieurs. Les pôles opposés sont de noms contraires; entre ces pôles tourne un cylindre de papier mâché A qui porte les fils induits. Ceux-ci sont constitués par des cadres plats de même longueur que le cylindre; ces cadres, au nombre de trente-six, sont placés les uns sur les autres de manière à se recouvrir partiellement, à peu près comme le font des cartes

à jouer étalées d'un coup de main sur le tapis. Ils ne prennent ainsi qu'une faible épaisseur et, comme on leur a donné une largeur égale à la distance de deux pôles, il en résulte que lorsqu'un des grands côtés d'un cadre est influencé par un pôle, l'autre côté est influencé par un pôle de nom contraire

Fig. 28. — Machine Elphinston et Vincent (la *Lumière électrique*).



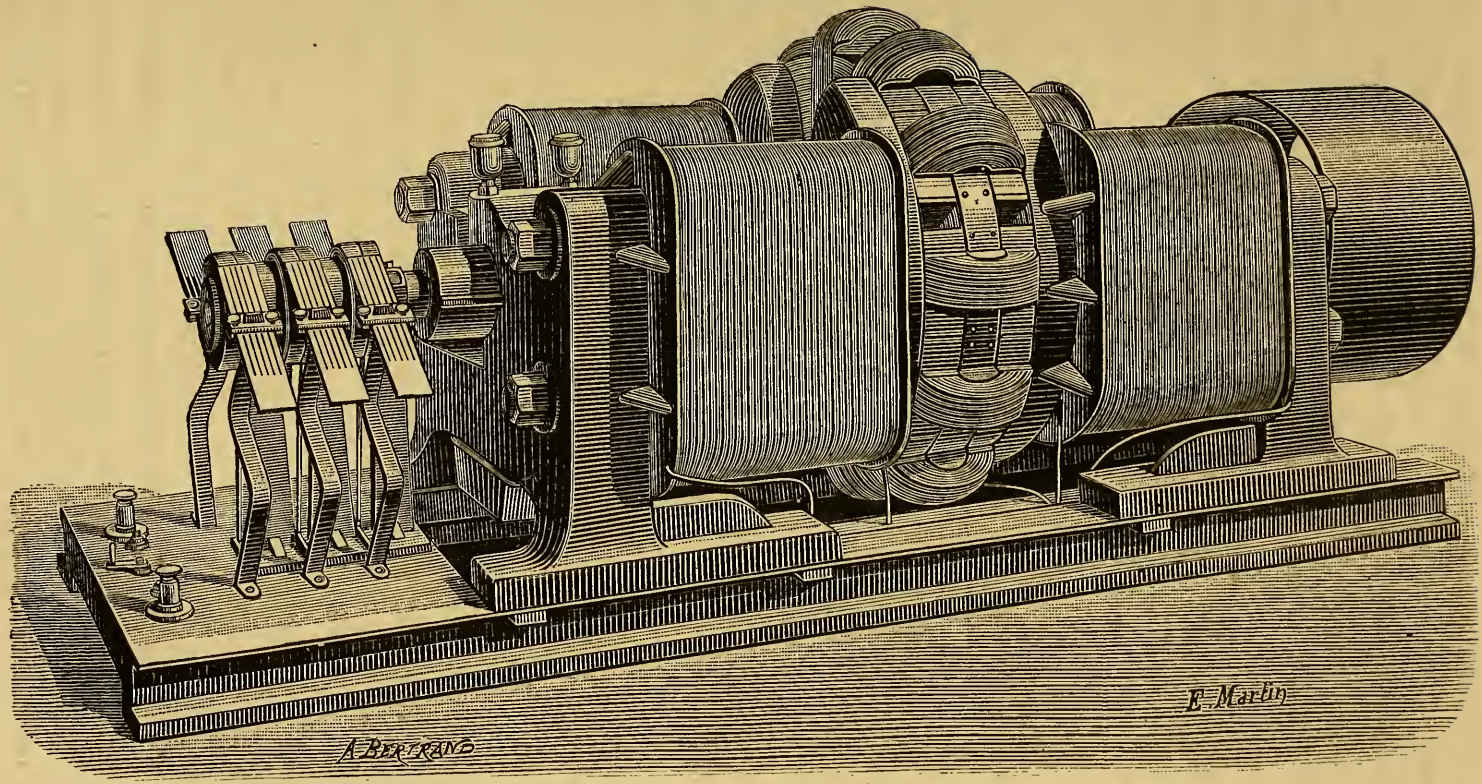
et les courants produits dans le cadre s'ajoutent. Les cadres qui constituent les bobines de l'anneau sont reliés à un collecteur : comme il y a six pôles, il faudrait six balais ; mais on conçoit qu'au lieu de réunir les balais pour constituer les deux pôles de la machine, on peut réunir à l'avance les lames du collecteur trois à trois par des communications en triangle, de manière à n'avoir que deux frotteurs.

C'est encore dans le but de diminuer l'action nuisible dans le fil intérieur de l'anneau Gramme que l'on a imaginé les machines à anneau aplati, dans lesquelles l'induction se produit, non pas sur la surface latérale de l'anneau, mais sur ses bases. L'enroulement est toujours le même que précédemment, seulement la hauteur de l'anneau est faible par rapport à son diamètre, de sorte que, si l'on assimile les bobines à des cadres rectangulaires, les grands côtés de ces rectangles, au lieu d'être parallèles à l'axe du cylindre, sont dirigés suivant des rayons.

La plus importante des machines construites d'après ce principe est la machine *Brush* (*fig.* 29); dans le principe, le noyau de l'anneau était massif, comme dans l'anneau Pacinotti, et présentait sur ses deux faces des rainures radiales, dans lesquelles se logeait le fil des bobines. Afin de diviser davantage la masse de ce noyau, ce qui est important comme nous le verrons plus tard, pour éviter les actions parasites, on emploie aujourd'hui la disposition suivante : un long ruban de tôle dont la largeur correspond à l'épaisseur du noyau des bobines est enroulé en spirale; pendant l'enroulement, on intercale entre les spires du ruban de fer de petites lames de fer dépassant le ruban de part et d'autre et dont la longueur représente l'épaisseur totale de l'induit. Ces lames sont disposées de manière à ménager les rainures radiales destinées à recevoir le fil des bobines. L'induction est produite dans ces bobines par deux gros électro-aimants en fer à cheval disposés de chaque côté de l'anneau et opposés par les pôles de même nom; ces électro-aimants portent des épanouissements polaires en forme d'arc de cercle; chacun de ces appendices, que l'on aperçoit sur la figure, occupe environ les $\frac{3}{8}$ de la surface de l'anneau.

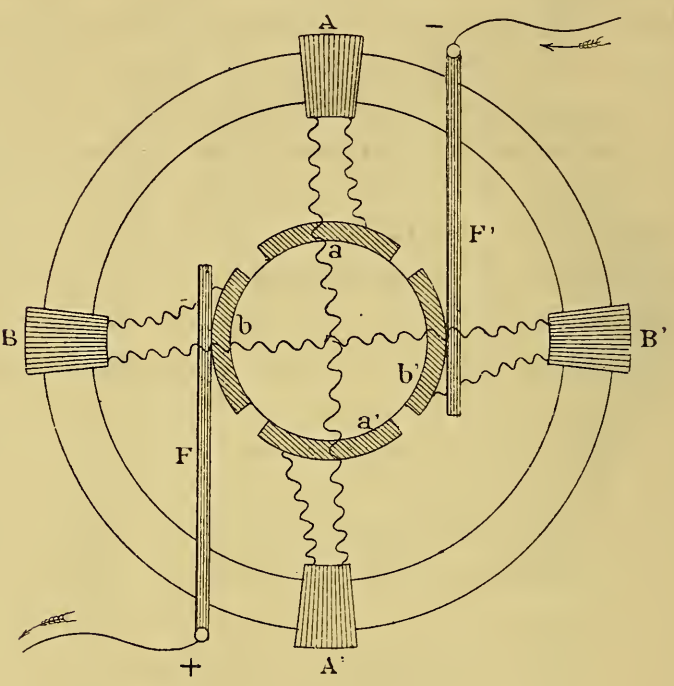
En outre de la forme de son anneau, la machine Brush présente une particularité remarquable, c'est la manière dont les courants sont recueillis. On a, en effet, employé non pas le collecteur Gramme, mais le commutateur Clarke qui est

Fig. 29. — Machine Brush (la *Lumière électrique*).



alors disposé de la manière suivante. Supposons d'abord, pour simplifier, qu'il n'y ait que quatre bobines A, A′, B, B′ (*fig.* 30) placées à 90° l'une de l'autre et présentant, par conséquent, huit fils libres. Plaçons sur l'axe de rotation un commutateur à quatre coquilles *a*, *b*, *a′*, *b′*, reliées chacune aux

Fig. 30.



quatre fils entrants des bobines et réunissons les fils sortants des bobines A et A′ qui sont diamétralement opposées, ainsi que ceux des bobines B et B′. D'après la disposition donnée aux inducteurs, la ligne neutre est verticale, c'est-à-dire que, lorsque les bobines traversent cette ligne, elles sont parcourues par des courants d'intensité à peu près nulle, tandis que l'intensité est au contraire maxima pour les bobines qui sont sur le diamètre horizontal. Si donc nous plaçons deux frotteurs, tels que F, F′, il est facile de se rendre compte sur la figure que le circuit extérieur sera constamment en relation avec les bobines pour lesquelles l'action est

maxima, tandis que celles où cette action est nulle se trouvent mises hors du circuit. Dans la pratique, les coquilles voisines se recroisent de manière qu'un frotteur n'abandonne pas une coquille avant d'être en contact avec la suivante; on évite ainsi les interruptions de circuit et, par suite, les étincelles aux balais.

L'ensemble des quatre bobines A, B, A′, B′ forme, pour ainsi dire, une machine élémentaire; lorsqu'il y a douze bobines, comme dans la machine représentée (*fig.* 29), ces bobines sont partagées en trois groupes de quatre; les bobines de chaque groupe sont situées aux extrémités des deux diamètres rectangulaires. Il y a alors sur l'arbre de rotation trois commutateurs semblables à celui que nous venons de décrire et six balais, ce qui fournit trois courants distincts.

La machine *Schuckert* a la même disposition que la machine Brush; seulement les bobines sont plus nombreuses et les courants sont recueillis au moyen d'un collecteur Gramme.

La compagnie Brush a également construit des machines désignées sous le nom de machines *Victoria,* qui sont analogues à la machine Schuckert, avec cette différence que les inducteurs présentent quatre pôles sur chaque face de l'anneau. Les surfaces des épanouissements polaires ont été diminuées et enfin les lames du collecteur ont été réunies deux à deux, de manière à n'employer que deux balais au lieu de quatre.

La disposition consistant à employer un anneau de forme aplatie a du reste été appliquée par M. Gramme lui-même, dans une machine destinée au transport de la force. Les inducteurs de cette machine se composent d'une série d'électro-aimants montés en cercle sur deux plateaux parallèles et perpendiculaires à l'axe de l'anneau. Les pôles des électro-aimants sont, sur un plateau, alternativement nord et sud et de mêmes noms que ceux qui sont en regard sur l'autre plateau. Il y a douze pôles sur chaque face de l'anneau, ce qui nécessite douze balais. Cette disposition des inducteurs, que nous

retrouverons dans les machines à courants alternatifs, semble peu avantageuse pour les courants continus; de plus, il y a toujours inconvénient à employer un aussi grand nombre de balais, les frotteurs constituant l'organe le plus délicat d'une machine électrique.

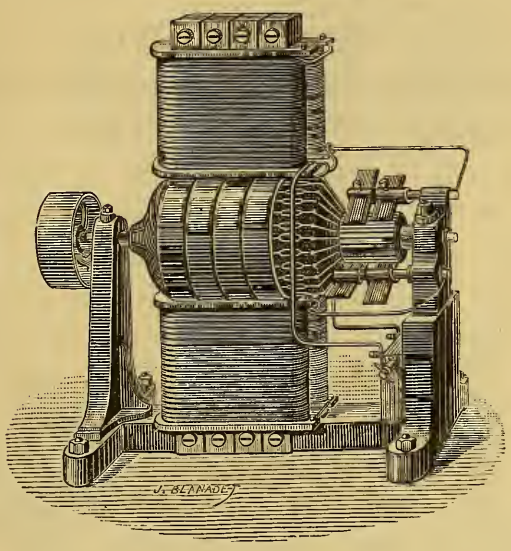
Aux machines à anneau plat, il faut rattacher les machines dites à *disque,* bien que dans ces dernières la forme de l'anneau Gramme ait complètement disparu. Dans une machine construite par Sir William Thomson, l'induit est formé d'une série de barres de cuivre rayonnantes; leur largeur diminuant forcément près du centre, on augmente leur hauteur, de sorte que chaque barre gagne en hauteur ce qu'elle perd en largeur et que sa section reste constante. Ce disque est monté sur un axe vertical et tourne entre des inducteurs demi-circulaires; les courants sont recueillis par des galets frottant sur les prolongements des barres qui forment collecteur.

Citons encore, comme machine de ce genre, la machine *Ferranti,* dans laquelle le disque est vertical et où les courants sont recueillis avec du mercure, comme dans l'expérience de la roue de Barlow. Ces machines ne semblent pas du reste être entrées dans la pratique.

Dans toutes les machines que nous venons de décrire, à l'exception des deux dernières, l'induit a la forme d'un tore de révolution constitué par un noyau en fer doux sur lequel est enroulé le fil isolé. Dans les machines que nous allons examiner maintenant, l'enroulement du fil induit est différent: le noyau étant constitué par un cylindre en fer doux, le fil isolé est enroulé parallèlement à l'axe suivant des génératrices, mais de manière à rester toujours à l'extérieur du cylindre. Ce mode d'enroulement a été imaginé par la maison Siemens de Berlin, et le type des machines de ce genre est la machine *Siemens,* représentée *fig.* 31. Le fil de l'induit étant continu, les courants sont recueillis au moyen d'un collecteur Gramme. L'enroulement est fait comme nous venons de le dire; sur la base du cylindre qui porte le collecteur, les fils sont disposés

suivant les côtés d'un polygone étoilé de manière à laisser libre au centre l'espace occupé par le collecteur ; sur l'autre base les fils sont disposés suivant des diamètres et s'écartent légèrement vers le centre pour laisser passer l'arbre. Quant à l'inducteur, il est formé par des électro-aimants à points conséquents. Les épanouissements en fer, au lieu d'être massifs, comme dans la machine Gramme, sont formés de bandes

Fig. 31. — Machine Siemens (*Jamin et Bouty*).

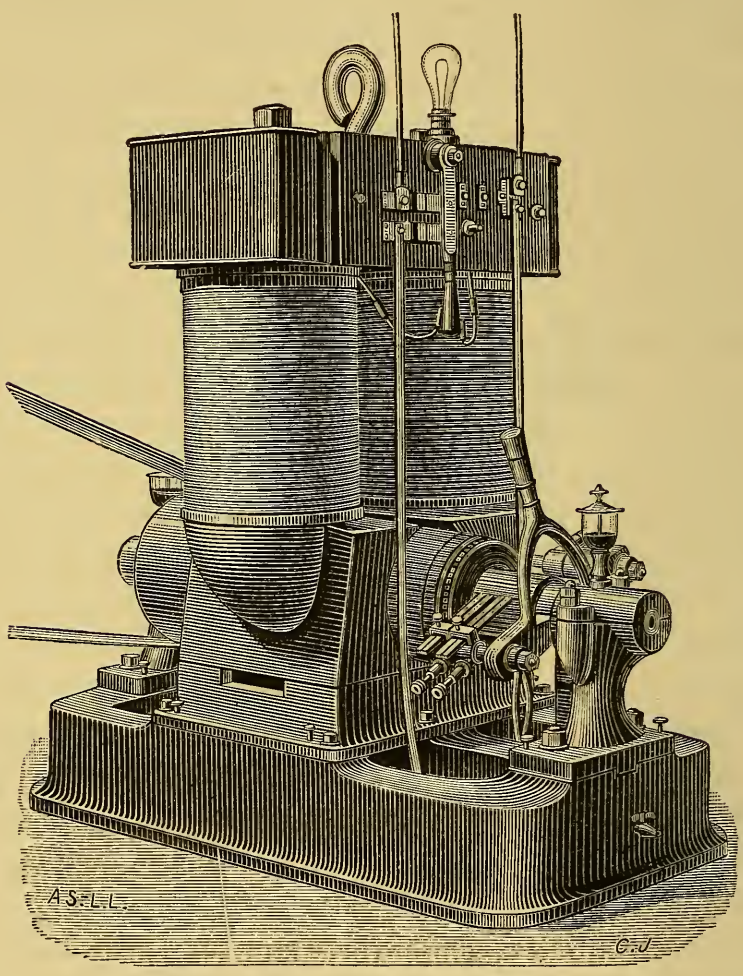


de fer recourbées embrassant l'induit. Avec cette disposition, on voit que les portions de fil situées sur les bases du cylindre tournant sont soustraites à l'induction ; pour atténuer cet inconvénient, on augmente la dimension de l'induit dans le sens de son axe, par rapport à son diamètre. On est alors conduit à employer, pour les électro-aimants inducteurs, des bobines plates agissant sur toute la longueur de l'induit.

La machine *Weston* présente la même disposition que la précédente ; toutefois le noyau de l'anneau, au lieu d'être, comme dans l'induit Siemens, formé par une carcasse en fils de fer, est obtenu, comme celui de la machine Maxim, au

moyen de rondelles de tôle superposées dont l'ensemble forme un cylindre présentant des cannelures longitudinales; le fil isolé est enroulé dans ces cannelures, comme il a été dit plus haut. En outre, les lames du collecteur sont légèrement héli-

Fig. 32. — Machine Edison (la *Lumière électrique*).



coïdales, afin que chaque balai ne puisse pas quitter une des lames, avant d'être en contact avec la suivante. Cette disposition a pour but de donner plus de régularité au courant.

La *fig.* 32 représente la machine *Edison* telle qu'elle existait à l'exposition de Philadelphie. Elle se compose,

comme on le voit, d'un gros électro-aimant en fer à cheval terminé par deux blocs de fer forgé entre lesquels tourne l'induit; celui-ci est du genre Siemens; mais, comme on voulait une machine ayant une résistance très faible, on a employé, au lieu de fil, des barres de cuivre disposées suivant les génératrices du cylindre; ces barres sont reliées à leurs extrémités, de manière à compléter le circuit; les courants sont recueillis au moyen d'un collecteur Gramme.

La machine *Thury*, employée en Suisse pour le transport de la force, est une machine à six pôles. Elle a la forme d'un prisme hexagonal dont les faces sont constituées par des électro-aimants plats. Les angles internes sont remplis par des épanouissements polaires alternativement nord et sud, qui forment à l'intérieur un cylindre creux dans lequel tourne un induit Siemens. Comme il y a six pôles, on a six frotteurs qu'on peut accoupler de différentes façons, mais qui sont ordinairement réunis en quantité.

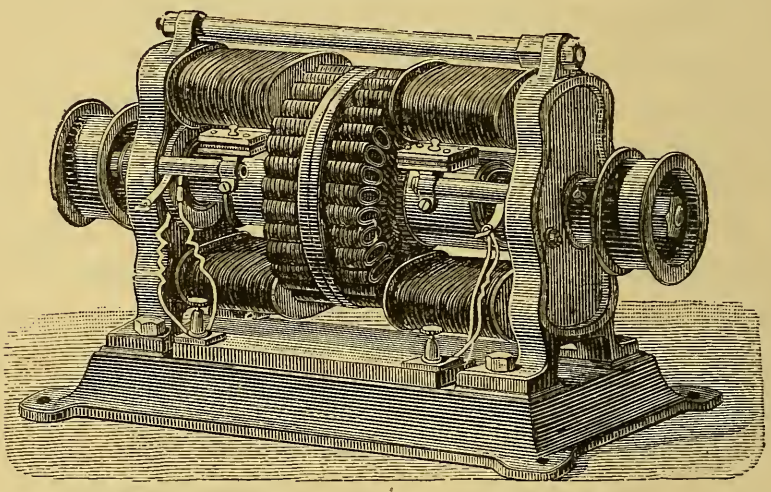
Dans la machine *Elihu Thomson*, l'inventeur a cherché à utiliser, pour l'induction, les fils des extrémités de l'induit Siemens; pour y arriver, il a donné à son induit la forme d'une sphère. Les inducteurs sont constitués par deux gros électro-aimants creux présentant deux épanouissements hémisphériques. Dans cette machine, l'induit porte trois circuits complètement distincts; les courants sont recueillis par un commutateur, et une disposition analogue à celle que nous avons indiquée, à propos de la machine Brush, met hors du circuit général une des bobines au moment où celle-ci est inactive.

Signalons encore la machine *Stanley*, qui se rapprocherait plutôt de la bobine Siemens à double T. En effet, l'induit de cette machine peut être considéré comme formé de deux bobines Siemens disposées en croix. Les deux circuits de ces bobines sont séparés et aboutissent à un commutateur semblable à celui de la machine Brush à quatre bobines. Les balais recueillent donc alternativement les courants déve-

loppés dans les deux circuits. Les inducteurs sont des électro-aimants ordinaires qui ne présentent rien de particulier.

Dans les machines que nous venons de passer en revue et appartenant, soit au genre Gramme, soit au genre Siemens, les bobines de l'induit sont toutes enroulées sur un noyau commun; dans les appareils qui nous restent à décrire, les bobines de l'induit ont chacune leur noyau distinct, comme dans la machine de Clarke ou de l'Alliance. La *fig.* 33 repré-

Fig. 33. — Machine Wallace-Farmer (la *Lumière électrique*).



sente un appareil de ce genre : c'est la machine *Wallace-Farmer,* dans laquelle l'induit est formé de bobines parallèles à l'axe de rotation et disposées en couronne sur un plateau perpendiculaire à cet axe. Les bouts de chaque bobine sont reliés à ceux des deux bobines contiguës et à un collecteur Gramme; les inducteurs sont formés par des électro-aimants plats; comme on le voit sur la figure, le plateau mobile porte une série de bobines sur chaque face; les deux séries de bobines sont distinctes et il y a deux collecteurs. Ce sont donc en réalité deux machines montées sur le même axe et fournissant deux courants séparés. Il faut remarquer qu'avec cette disposition des bobines induites, le courant change de sens dans ces bobines au moment où elles passent devant les pôles

de l'aimant inducteur, comme pour la machine de Clarke ; il en résulte que les balais sont placés, non plus sur le diamètre perpendiculaire à la ligne des pôles inducteurs, comme cela a lieu dans la machine Gramme, mais sur la ligne même de ces pôles. Cette remarque s'applique à toutes les machines du même genre.

La machine *Cance* offre la même disposition ; elle présente toutefois une particularité intéressante au point de vue de la construction des bobines, tant de l'induit que de l'inducteur. Au lieu d'enrouler simplement le fil isolé sur un noyau de fer doux, on a formé les bobines de couches alternatives de fil de fer et de fil de cuivre isolé, de sorte que le noyau se trouve réparti dans toute la masse. Cette disposition a pour but d'augmenter l'action des couches extérieures sur le fer du noyau.

La machine *Hopkinson Muirhead* appartient à la même catégorie ; elle se compose d'un tambour métallique formé de deux plateaux en fonte portant les inducteurs. Les noyaux de ceux-ci sont à section trapézoïdale ; leurs pôles sont alternativement nord et sud et à chaque pôle nord correspond un pôle sud dans l'autre série d'inducteurs. L'induit est construit de la manière suivante : autour de l'axe, on enroule une longue lame de fer dont on isole les spires ; on obtient ainsi un disque que l'on maintient au moyen de boulons allant du centre à la circonférence. Sur chaque face de ce disque on taille des rainures radiales, de manière à constituer des noyaux saillants autour desquels on enroule les bobines ; les rainures sont disposées de telle sorte que les bobines d'un côté du disque alternent avec celles de l'autre côté. On a donc ainsi des bobines aplaties dont la disposition est la même que dans les machines précédentes. La principale différence réside dans la façon dont les courants sont recueillis : de fait l'appareil comprend vingt lames disposées comme le collecteur Gramme, mais qui constituent un véritable commutateur. Prenons seulement les bobines d'un côté du plateau ; ces bobines

sont au nombre de dix, et chacune d'elles a ses extrémités reliées à deux lames voisines du commutateur. Dix frotteurs portés par la circonférence du tambour viennent s'appuyer sur ces lames. Ces frotteurs fournissent cinq courants séparés et en réalité on peut considérer deux frotteurs voisins comme les pôles d'une machine distincte. Pour que cette machine fournisse un courant, il faut que les deux frotteurs voisins considérés communiquent avec les deux extrémités d'une même bobine, c'est-à-dire avec deux lames voisines du commutateur. Si les frotteurs se composaient d'un simple ressort, cela ne pourrait pas avoir lieu, puisque la distance de leurs points de contact serait le $\frac{1}{10}$ de la circonférence et qu'il y a vingt lames. On a alors formé chaque frotteur de deux ressorts qui touchent le commutateur en deux points dont la distance est égale à la moitié de la largeur d'une lame; il est facile de se rendre compte qu'avec cette disposition la paire de frotteurs considérée se trouve mise successivement en contact avec chacune des bobines tournantes. Le contact n'a lieu que pendant que le courant a son maximum d'intensité. Les bobines de l'autre face du disque sont reliées aux premières. On a donc cinq courants distincts : l'un d'eux sert à alimenter les inducteurs, les quatre autres sont utilisés séparément ou réunis. Cette disposition, en somme, est ingénieuse, mais elle a l'inconvénient d'être assez compliquée et d'exiger un grand nombre de frotteurs.

Dans les machines à noyaux distincts dont nous venons de parler, les noyaux des bobines induites sont parallèles à l'axe de rotation. On trouve d'autres machines dans lesquelles les noyaux sont perpendiculaires à l'axe de rotation; nous citerons entre autres la machine *Lontin* qui figurait à l'Exposition universelle de 1878. L'induit de cette machine, auquel son inventeur donne le nom de *pignon* induit, se compose de bobines cylindriques ayant leurs axes implantés perpendiculairement à l'axe de rotation, comme les rais d'une roue. On dispose parallèlement sur l'axe plusieurs roues semblables,

en ayant soin de les mettre un peu en retraite les unes sur les autres, de manière que, dans le sens de l'axe, les bobines forment des hélices à pas très grand. Ces bobines reliées à un collecteur Gramme se meuvent entre les pôles d'un électro-aimant en fer à cheval dont le plan est perpendiculaire à l'axe de rotation.

La machine *Gérard* présente une disposition analogue; seulement l'induit ne renferme que quatre bobines allongées et ayant leurs grands côtés parallèles à l'axe. Les inducteurs sont formés de quatre électro-aimants disposés à l'intérieur d'un bâti cylindrique et présentant quatre pôles. Les courants sont redressés au moyen d'un commutateur; les bobines sont reliées deux à deux, de manière à n'employer que deux balais.

Toutes les machines à noyaux distincts sont inférieures aux précédentes, au point de vue de la régularité du courant; car, avec cette disposition, les bobines de l'induit sont forcément moins nombreuses qu'avec la disposition des induits Gramme ou Siemens. On est obligé alors, pour atténuer cet inconvénient, de leur donner de très grandes vitesses.

Le Tableau qui suit donne des indications sur quelques-unes des machines que nous venons de décrire. Les chiffres de ce Tableau ne se rapportent qu'à une seule expérience, pour chaque machine, qui n'a pas toujours été placée dans les meilleures conditions de travail. Ils sont simplement destinés à donner une idée de la puissance de ces machines. Lorsque les inducteurs sont excités en dérivation, la résistance intérieure portée dans la première colonne est la résistance de l'induit seul. La résistance extérieure, inscrite dans la deuxième colonne, est toujours une résistance inerte, c'est-à-dire se rapportant uniquement à un circuit métallique. Enfin la dernière colonne, intitulée *Rendement,* indique le rapport du travail électrique $\frac{Ei}{75g}$ au travail mécanique cédé par le moteur à la machine électrique, travail qui est inscrit à l'avant-dernière colonne.

DÉSIGNATION des machines.	RÉSISTANCE intérieure.	RÉSISTANCE extérieure.	DIFFÉRENCE de potentiel aux bornes.	FORCE électromotrice.	INTENSITÉ.	NOMBRE de tours par minute.	TRAVAIL absorbé.	RENDEMENT.	OBSERVATIONS.
	ohms	ohms	volts	volts	amp		ch. vap.	p. 100	
Gramme A	1,02	3,25	97	128	30,0	1440	6,0	88,0	Type d'atelier.
Gramme D	0,33	0,58	64	102	109,2	475	16,1	92,0	
Gramme auto-excitatrice	0,52	9,62	183	193	19,0	1695	8,1	62,0	
Marcel Deprez	56,70	794,00	2746	2944	3,5	996	14,0	"	Rendement très voisin de l'unité.
Edelmann	6,02	3,53	32	87	4,2	1500	1,6	68,4	
Einstein	3,92	7,04	55	85	7,8	800	2,5	36,4	
Mac Tighe	2,12	15,20	185	206	10,0	1500	3,1	74,2	
Hochausen, n° 4	"	"	750	"	10,0	"	"	"	Avec 15 lampes à arc.
Maxim	0,70	1,85	61	84	33,0	737	4,4	91,0	
Bürgin	4,20	7 00	158	253	22,8	1622	8,8	88,1	
Schwerd et Scharnweber	3,57	13,22	197	250	14,9	1000	5,8	86,8	
Jurgensen et Lorenz	0,45	1,50	131	172	90,0	800	21,7	97,0	
Elphinston et Vincent	0,04	0,40	72	79	180,0	868	"	"	Inducteurs en dérivation.
Brush	22,38	186,60	1796	2009	9,5	700	30,0	83,0	
Schuckert	13,60	56,31	418	519	7,4	898	6,8	76,5	
Siemens D	0,66	1,63	57	80	35,0	737	4,4	86,0	
Weston	1,88	15,41	355	398	23,0	1003	13,0	95,0	
Edison Z	0,16	4,55	126	131	27,7	1197	8,8	61,9	Inducteurs en dérivation.
E. Thomson M	21,00	161,00	1600	1802	9,6	"	26,2	89,6	
Gérard	"	5,00	100	"	20,0	"	3,5	"	

Machines à courants alternatifs, magnéto-électriques. — Les machines de cette espèce sont peu nombreuses; parmi elles, nous citerons seulement la machine *de Méritens* qui présente la même disposition que celle que nous avons décrite (p. 89). Seulement les inducteurs, au lieu d'être formés de faisceaux aimantés droits, sont constitués par des aimants en fer à cheval dont le plan est parallèle à l'axe de rotation de l'anneau qui tourne alors à l'intérieur d'une couronne composée de pôles alternativement nord et sud. Le noyau de l'induit est construit comme dans la machine dynamo-électrique; quant aux bobines, elles présentent les différences suivantes : d'abord le circuit est ouvert et ses extrémités sont reliées à deux bagues de cuivre fixées sur l'axe, sur lesquelles appuient deux frotteurs qui forment les pôles de la machine. Le nombre des bobines de l'induit étant égal au nombre des pôles inducteurs, on voit que, quand une bobine s'approche par exemple d'un pôle nord, la bobine voisine s'approche d'un pôle sud, de telle sorte que, si les bobines étaient enroulées toutes dans le même sens, les courants induits dans deux bobines voisines se détruiraient; on a dû alors enrouler les bobines alternativement dans un sens et dans l'autre, de sorte que tous les courants induits s'ajoutent dans le circuit général. Mais, comme le courant est renversé chaque fois qu'une bobine s'éloigne d'un pôle après s'en être rapprochée, on voit que finalement la machine donnera des courants alternatifs dans le circuit extérieur.

Dans la machine dont nous venons de parler, il y a huit aimants inducteurs, soit seize pôles et par suite seize bobines à l'induit. M. de Méritens a construit, pour l'éclairage des phares, des machines de grandes dimensions qui comprennent cinq machines semblables à la précédente. Les cinq anneaux sont montés parallèlement sur le même arbre; quant aux inducteurs, ils sont placés de manière que leur plan coïncide avec celui de l'anneau, la disposition des pôles restant la même. Il y a en tout quarante aimants qui se trouvent alors disposés comme l'étaient ceux de la machine *l'Alliance.*

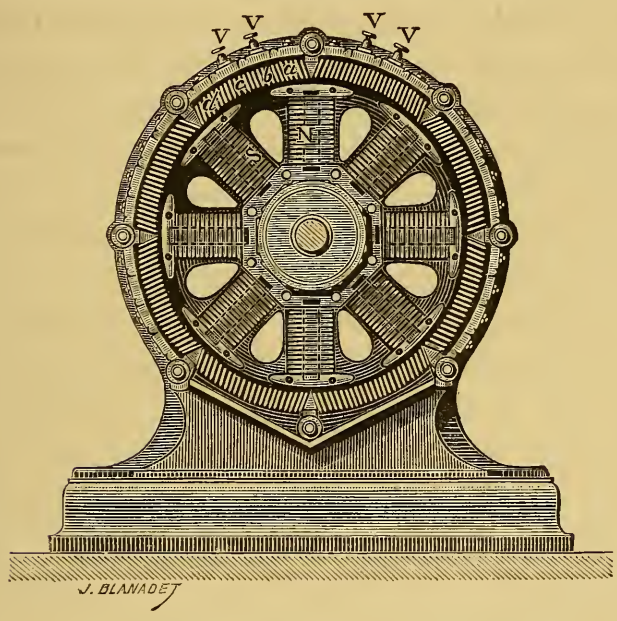
Machines à courants alternatifs, dynamo-électriques. — Avant d'entreprendre la description des principales machines dynamo-électriques employées pour la production des courants alternatifs, nous devons d'abord remarquer que, dans les machines de cette espèce, le courant qui parcourt les inducteurs ne peut pas être le même que celui qui parcourt l'induit, attendu que les inducteurs, ne devant pas changer de polarité, sont forcément excités par des courants continus. On devra donc avoir en réalité deux générateurs d'électricité, l'un fournissant des courants alternatifs, l'autre fournissant des courants continus destinés à alimenter les inducteurs du premier. Quant à la disposition à adopter pour l'installation de ces générateurs, on a le choix entre trois solutions : 1° les deux générateurs sont complètement séparés l'un de l'autre : on emploie alors comme excitatrice une des machines à courants continus précédemment décrites ; 2° les deux générateurs ont leurs parties mobiles montées sur le même arbre, de manière à être mis en mouvement au moyen d'une seule transmission ; 3° les deux générateurs ont les mêmes inducteurs, c'est-à-dire qu'une partie des courants produits dans l'induit est redressée pour alimenter les inducteurs. Nous trouverons des exemples de ces trois solutions.

Pour l'énumération des différentes machines, nous les grouperons, comme nous l'avons fait pour les machines à courants continus, d'après la disposition de leurs bobines mobiles.

Nous nous occuperons d'abord de la machine Gramme (*fig.* 34), dans laquelle nous trouvons comme induit un anneau analogue à celui de la machine à courants continus, formé d'un noyau en fil de fer sur lequel sont enroulées les bobines induites, de manière que leurs spires aient leurs grands côtés parallèles à l'axe du cylindre. Cet anneau est fixe et les inducteurs qui se meuvent à l'intérieur comprennent huit bobines plates disposées sur l'axe comme des ailettes. C'est, comme on le voit, la disposition de l'induit dans les machines Lontin ou Gérard à courants continus ; ces électro-aimants portent des épanouissements en fer passant aussi près

que possible de la surface intérieure de l'anneau et leurs pôles sont alternés, de sorte que chaque bobine de l'induit, étant influencée successivement par un pôle nord et par un pôle sud, se trouve être le siège de courants alternatifs. Ces bobines induites, au nombre de trente-deux, sont toutes distinctes les unes des autres, de sorte qu'on a en réalité trente-deux courants que l'on peut alors grouper comme on veut, à la con-

Fig. 34. — Machine Gramme à courants alternatifs (*Jamin et Bouty*).



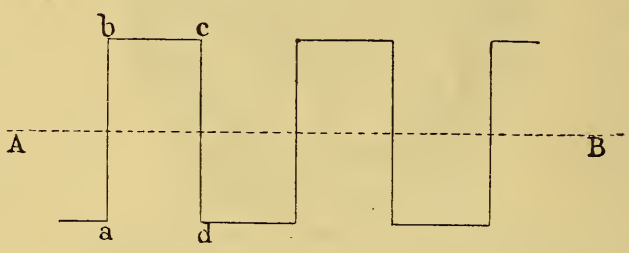
dition, bien entendu, de réunir ensemble des courants qui sont de même sens au même instant. On conçoit qu'il y a avantage à faire mouvoir les inducteurs plutôt que l'induit, car on peut alors modifier les combinaisons des courants pendant la marche.

Dans cette machine, les inducteurs sont alimentés par le courant d'une machine dynamo-électrique à courants continus séparée, au moyen de deux frotteurs qui sont en contact permanent avec les extrémités du circuit inducteur. M. Gramme a modifié cette disposition en montant l'anneau de la machine excitatrice sur le même arbre que les inducteurs mobiles. Il

y a toujours deux machines distinctes, seulement l'installation mécanique est simplifiée. Cette machine est désignée par M. Gramme sous le nom d'*auto-excitatrice,* dénomination qui n'est du reste pas très heureusement choisie, car elle s'appliquerait mieux aux machines où l'on emploie la troisième solution pour l'excitation des inducteurs.

Dans la machine *Schuckert,* les inducteurs sont semblables à ceux de la machine Gramme; seulement il y en a dix au lieu de huit: ils tournent également à l'intérieur d'un tambour cylindrique qui porte le fil induit, et c'est par le mode d'enroulement de celui-ci que la machine se distingue de la précédente. Considérons un fil métallique *abc*... replié comme l'indique la *fig.* 35 et situé dans un plan. Plaçons sur

Fig. 35.



une droite parallèle à ce plan une série de pôles magnétiques alternativement nord et sud, ayant entre eux un intervalle égal à *bc*; supposons enfin que cette ligne de pôles alternés se déplace suivant AB. Si au début les pôles se trouvaient en regard des fils *ab*, *cd*, ..., il est facile de voir que pendant toute la durée d'un déplacement égal à *bc*, c'est-à-dire jusqu'à ce que les pôles placés en regard de chaque fil aient changé de noms, les diverses portions *ab*, *cd*, ... vont être parcourues par des courants qui s'ajouteront dans le circuit général *abc*.... Pendant la période suivante, le courant aura changé de sens; on aura donc, par le déplacement continu de AB, une série de courants alternatifs. Telle est la disposition de la machine Schuckert; seulement le fil induit, au lieu d'être dans un plan, est fixé à l'intérieur d'un cylindre dont les por-

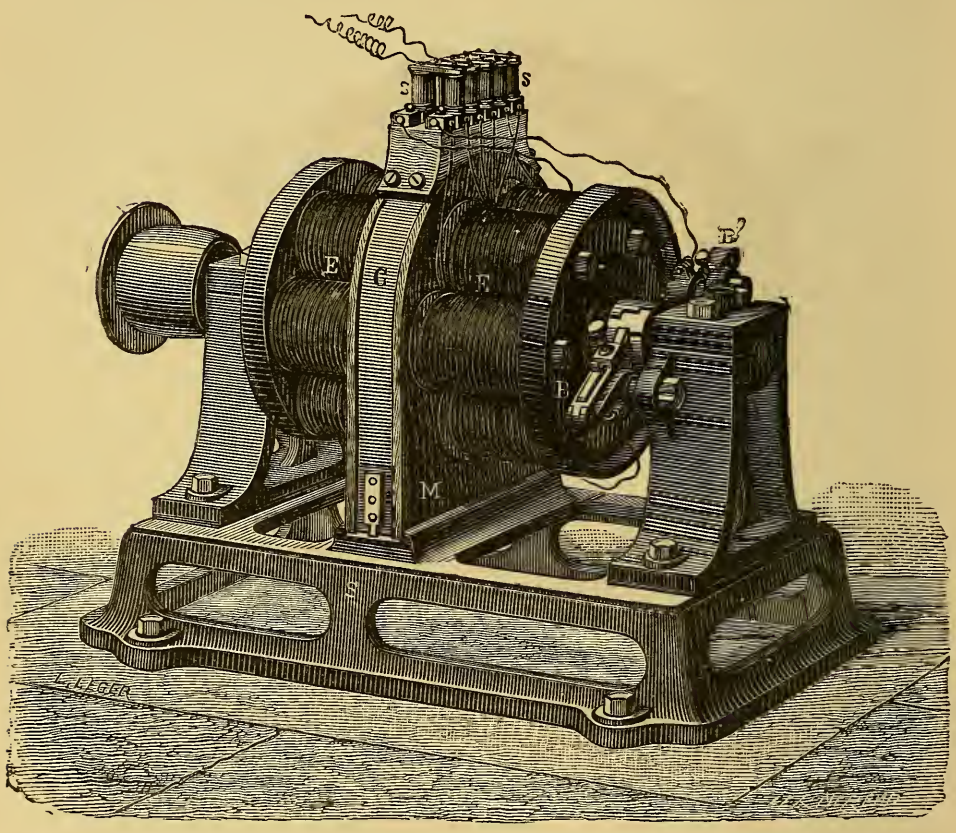
tions *ab*, *cd*, ... sont des génératrices et le déplacement rectiligne AB est alors représenté par la rotation des inducteurs autour de l'axe du cylindre. En outre, on a disposé cinq fils parallèles isolés les uns des autres, de sorte qu'il y a cinq circuits distincts. Quatre d'entre eux sont utilisés ensemble ou séparément, le cinquième aboutit aux coquilles d'un commutateur qui redresse les courants et fournit par conséquent des courants continus que l'on emploie à exciter les inducteurs. Il n'y a donc plus ici de machine excitatrice séparée; c'est l'application de la troisième solution signalée plus haut.

Dans d'autres machines, on a placé les bobines induites à l'intérieur d'un tambour cylindrique, de manière que leurs axes soient dirigés suivant des rayons, comme ceux des bobines inductrices. A cette catégorie se rapporte la machine *Ganz*, représentée *fig.* 36. Elle est formée d'un cylindre garni à l'intérieur de bobines plates, dans lequel tourne un deuxième cylindre muni extérieurement de bobines analogues; celles-ci sont les inducteurs. A l'Exposition d'électricité de Vienne, en 1883, figurait une machine Ganz de grandes dimensions, construite pour alimenter douze cents lampes à incandescence. L'arbre des inducteurs mobiles portait un anneau Gramme ayant pour inducteurs des électro-aimants distincts. Le mode d'excitation est donc le même que dans la machine Gramme dite *auto-excitatrice*.

La machine *Jablochkoff* est une machine du même genre; ses inducteurs sont allongés en forme d'ailettes comme ceux de la machine Gramme; seulement, au lieu d'être, comme dans celle-ci, disposés dans des plans passant par l'axe, ils ont une forme légèrement hélicoïdale. C'est la disposition que nous avons déjà signalée à propos des machines Lontin et Bürgin. Les bobines induites de la machine Jablochkoff sont disposées sur la circonférence d'un tambour sur lequel elles sont fixées au moyen d'étriers. On peut ainsi les enlever facilement pour les réparations, sans qu'il soit nécessaire d'arrêter la machine et le fonctionnement des autres circuits.

Dans les machines dont nous allons maintenant nous occuper, les bobines inductrices et induites agissent les unes sur les autres par leurs extrémités comme dans la machine Wallace-Farmer, c'est-à-dire que toutes ces bobines ont leurs axes parallèles à l'axe de rotation. Signalons d'abord la machine Siemens (*fig.* 37), dans laquelle l'induit est mobile.

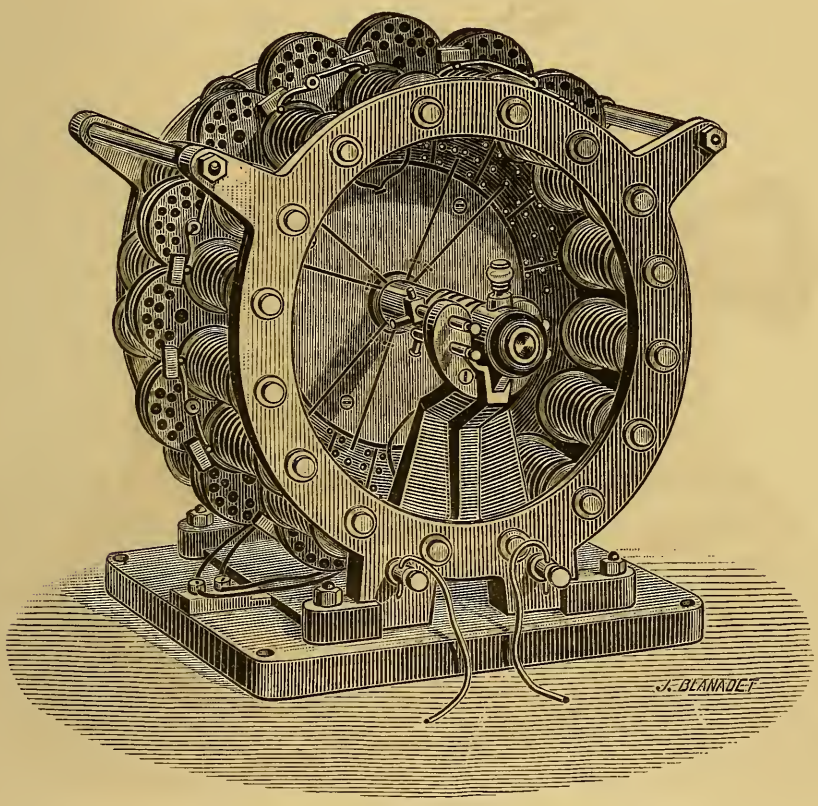
Fig. 36. — Machine Ganz (la *Lumière électrique*).



Celui-ci se compose d'une série de bobines ovales disposées sur la circonférence d'un plateau et ne renfermant pas de noyaux en fer. Bien que la suppression du fer dans les bobines diminue le nombre des lignes de force coupées par le circuit induit, nous verrons dans le Chapitre suivant que cet inconvénient se trouve compensé par certains avantages. Les inducteurs sont des électro aimants dont les pôles sont al-

ternés et qui sont disposés en couronnes de chaque côté de l'induit sur deux bâtis en fonte perpendiculaires à l'axe de rotation, comme dans la machine Gramme à douze pôles décrite ci-dessus. Chaque série d'inducteurs comprend autant d'électro-aimants qu'il y a de bobines induites; celles-ci sont reliées de manière que leurs courants s'ajoutent pour pro-

Fig. 37. — Machine Siemens à courants alternatifs (*Jamin et Bouty*).



duire un courant extérieur unique. L'excitation des inducteurs se fait au moyen d'une machine à courants continus séparée.

A côté de la machine Siemens, se place la machine *Ferranti,* qui présente, pour son induit, une disposition analogue à la machine Schuckert. Imaginons en effet que le circuit de la *fig.* 35, au lieu d'être enroulé sur un cylindre, soit replié dans son plan suivant une couronne circulaire dont les lignes

ab, *cd*, ... seraient des rayons. Cette couronne se compose d'une grande bande de cuivre enroulée de manière à former un seul circuit dont les deux extrémités se rendent à deux bagues de cuivre sur lesquelles frottent les balais. Les inducteurs comprennent, sur chaque face de l'induit mobile, seize bobines à section ovoïde, disposées comme dans la machine Siemens. Le fonctionnement des deux appareils est le même : si l'on considère dans l'induit deux parties radiales voisines, on voit que, quand l'une s'approche d'un pôle nord, l'autre s'approche d'un pôle sud et que par suite les courants s'ajoutent.

La machine *Wilde* présente encore la disposition de la machine Siemens ; elle se compose toujours de trois plateaux parallèles, les deux extrêmes portant les inducteurs, tandis que celui du milieu, qui est mobile, porte les bobines induites. Celles-ci sont disposées sur les deux faces du plateau, comme dans la machine Wallace-Farmer, et renferment des noyaux de fer doux. Enfin, dans la machine Wilde, on a mis à part le circuit d'un certain nombre de bobines qui sont alors reliées à un commutateur chargé de redresser les courants ; ces courants continus servent à alimenter les inducteurs, ce qui supprime l'emploi d'une machine excitatrice séparée.

Dans la machine *Chertemps*, on retrouve encore les trois plateaux décrits ci-dessus, seulement le plateau du milieu est fixe, tandis que les plateaux extrêmes qui portent les inducteurs sont mobiles. On peut alors employer autant de courants distincts qu'il y a de bobines induites, et modifier, même pendant la marche, les combinaisons formées avec ces courants ; c'est l'avantage que présentent les machines à induit fixe. Ajoutons que dans la machine Chertemps un commutateur porté par l'arbre des inducteurs mobiles redresse une partie des courants pour exciter ces inducteurs.

La machine *Gérard* présente la même disposition, seulement les inducteurs sont excités par une machine séparée.

Dans la machine *Lachaussée-Lambotte,* disposée comme

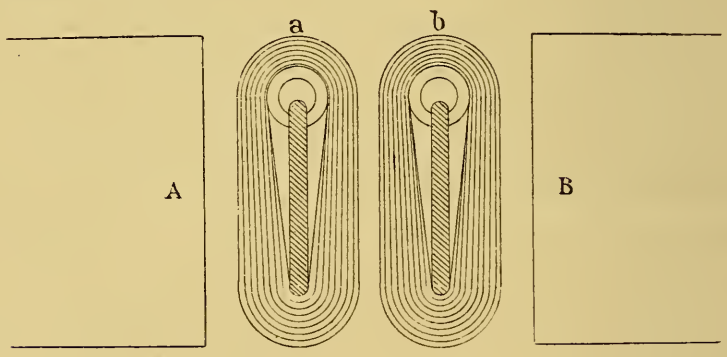
les précédentes, on s'est surtout préoccupé, comme on l'avait fait pour la machine Jablochkoff, de la possibilité de réparer une ou plusieurs bobines de l'induit fixe, sans qu'il soit nécessaire d'arrêter le service de la machine. Pour cela, ces bobines sont retenues du côté du centre, entre deux disques de bois serrés sur un manchon central; vers la circonférence, elles viennent s'encastrer dans des pièces de bois mobiles logées elles-mêmes dans un anneau formant tambour extérieur. Grâce à cette disposition, on peut retirer aisément les bobines du tambour, sans même arrêter la machine. Ces bobines sont ovales et le vide intérieur est rempli partiellement au moyen de lames de fer.

Citons enfin comme machine du même type la machine *Gordon*, dans laquelle les inducteurs mobiles sont disposés sur le plateau médian, à la façon des bobines induites de la machine Wallace-Farmer. Les bobines induites de la machine Gordon sont alors disposées en deux séries de chaque côté de la partie mobile; il y en a soixante-quatre dans chaque série, soit en tout cent vingt-huit. Cette machine est remarquable surtout par ses dimensions, puisqu'elle peut alimenter simultanément jusqu'à treize cents lampes à incandescence. Elle présente cependant une particularité intéressante et un progrès qui a pu être réalisé, grâce aux grandes dimensions de la machine et au grand nombre de bobines qu'elle renferme. Ordinairement le nombre des bobines induites est égal au nombre des bobines inductrices placées en regard. Dans ce cas, il se produit entre deux bobines voisines une induction nuisible et l'on constate que le courant d'une des bobines est affaibli lorsqu'on ferme le circuit de la bobine voisine. Cela tient à ce que, les pôles des deux inducteurs voisins étant contraires, deux bobines induites voisines sont dans ce cas parcourues au même instant par des courants de sens contraires qui agissent l'un sur l'autre. M. Gordon a remédié à cet inconvénient en réduisant de moitié le nombre des inducteurs, qui sont alors au nombre de trente-deux sur

chaque face du plateau mobile. Ceux-ci sont actionnés au moyen d'une machine excitatrice séparée.

La remarque que nous venons de faire au sujet de l'induction des bobines les unes sur les autres nous conduit à parler de la machine *Maquaire* dans laquelle on a cherché précisément à utiliser ces actions pour augmenter l'intensité des courants produits. Les inducteurs mobiles sont ici fixés sur les plateaux extérieurs, comme dans la machine Chertemps, l'induit fixe étant au milieu. Celui-ci, qui diffère complètement des précédents, comprend une série de bobines placées comme celles des machines Brush ou Victoria, mais conservant toutefois leurs noyaux distincts; de plus il y a deux anneaux semblables accolés. La *fig.* 38 permet de se rendre

Fig. 38.



compte de cette disposition; A et B représentant les inducteurs placés en regard l'un de l'autre, *a* et *b* sont les bobines appartenant à chacun des anneaux qui se trouvent dans le plan AB. Il est facile de concevoir alors que l'on puisse disposer l'enroulement des bobines *a* et *b* de manière que les actions produites, par exemple, dans la bobine *b* par les renversements du courant principal dans la bobine *a*, s'ajoutent à l'action de l'inducteur B sur la bobine *b*. Signalons en outre une disposition de détail dans la construction des bobines induites; nous verrons dans le Chapitre suivant, en étudiant le fonctionnement des machines à courants alter-

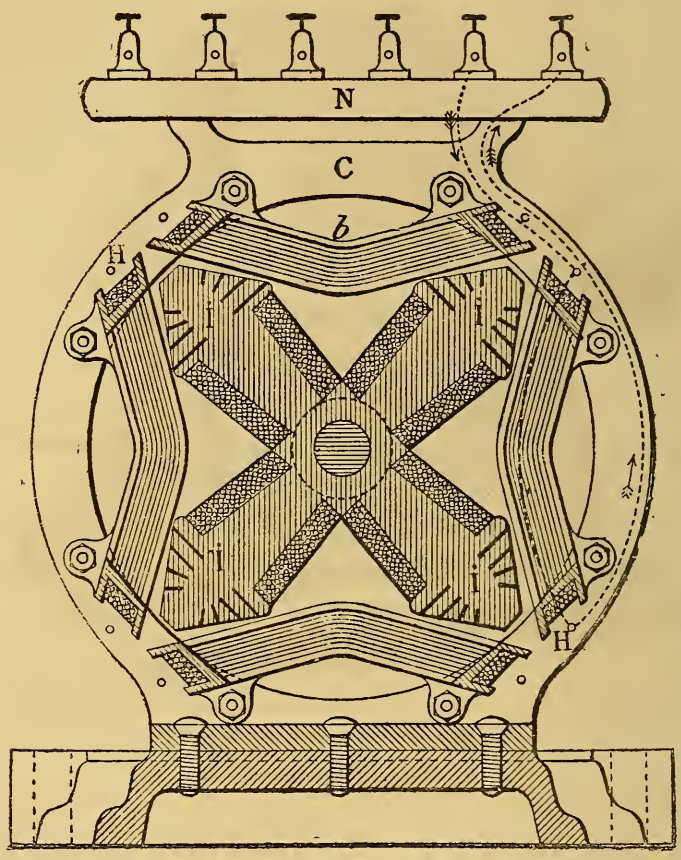
natifs, que, dans ces machines, les noyaux des bobines induites peuvent, à un moment donné, s'échauffer beaucoup plus que dans les machines à courants continus; pour éviter que cet échauffement ne compromette l'isolement des fils induits, on a, dans la machine Maquaire, éloigné ceux-ci du noyau de fer intérieur, au moyen d'un tube en cuivre que l'on voit sur la figure, de sorte que l'air peut circuler entre le fil isolé et le noyau. Enfin chaque bobine induite ayant un noyau distinct peut être déplacée suivant un rayon de l'anneau, de manière à être engagée plus ou moins entre les inducteurs A et B; cette disposition permet de régler la production dans les différents circuits, suivant les besoins de chacun d'eux, tout en conservant la même vitesse à la machine.

Nous avons dit plus haut que l'emploi du fer dans les bobines induites présente pour les machines à courants alternatifs des inconvénients assez sérieux, au point de vue de l'échauffement de ces noyaux. D'autre part, la suppression du noyau de fer diminue le nombre des lignes de force coupées par le circuit induit. C'est en vue d'éviter à la fois ce double inconvénient que l'on a construit des machines dans lesquelles l'induit est constitué par des cadres de grandes dimensions, à l'intérieur desquels se meuvent, soit les inducteurs eux-mêmes, soit leurs épanouissements. C'est ainsi que la machine *Rapieff* comprend un système induit fixe, composé de cinq grandes bobines circulaires parallèles à l'intérieur desquelles se meut le système inducteur.

La machine *Helmer,* représentée *fig.* 39, est construite sur le même principe; les induits sont formés par huit cadres *b* disposés par quatre de chaque côté d'une couronne en bronze C, les inducteurs se composent d'électro-aimants en croix *i*, *i*, portant des prolongements en fer doux. Il y a trois inducteurs semblables; les deux extrêmes agissent à l'intérieur de chaque série de cadres, tandis que celui du milieu se meut dans la couronne C et agit à la fois sur les deux séries de cadres induits. La figure montre que les grands côtés des

cadres, au lieu d'être rectilignes, sont repliés suivant un angle obtus. Cette disposition a pour but de rapprocher de 90° la valeur de l'angle sous lequel les lignes de force rencontrent les circuits induits. Les inducteurs sont excités au moyen d'une machine séparée.

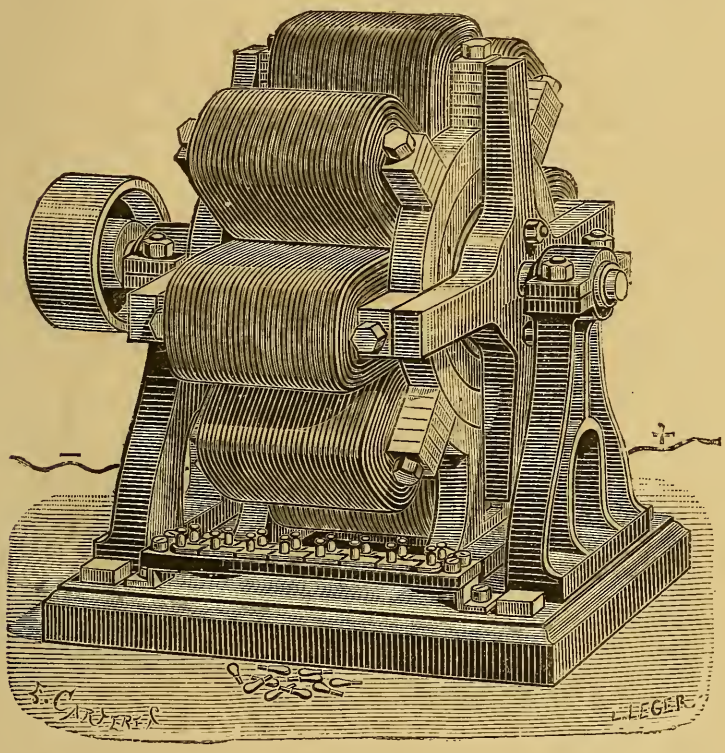
Fig. 39. — Machine Helmer (la *Lumière électrique*).



Signalons, pour terminer cette énumération, la machine *Klimenko,* qui ne se rapproche d'aucune de celles dont nous venons de parler, car dans cette machine (*fig.* 40) le circuit inducteur et le circuit induit sont fixes tous deux : c'est le noyau des inducteurs seul qui est mobile. Les modifications du champ magnétique sont donc produites, comme dans la machine de Page, par le déplacement de masses de fer dans

ce champ. L'inducteur de la machine Klimenko est formé d'un gros électro-aimant ayant pour noyau l'axe même de la machine, qui à chaque extrémité se termine par un épanouissement en forme de croix. Les bobines induites fixes ont leurs axes parallèles à l'axe de rotation et sont rangées au-

Fig. 40. — Machine Klimenko (la *Lumière électrique*).



tour de l'inducteur. Lorsque le noyau est en mouvement, les pôles en croix viennent passer devant les extrémités de ces bobines et déterminent la production de courants. La machine excitatrice est séparée.

Nous terminerons là cette description des machines; ainsi que nous l'avons dit plus haut, elle est loin d'être complète et comprend seulement les machines les plus connues et les plus employées jusqu'à présent.

CHAPITRE TROISIÈME.

THÉORIE ET PROPRIÉTÉS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

L'examen des machines passées en revue dans le Chapitre précédent fait connaître les dispositions adoptées dans la pratique pour les différents organes de ces machines; il nous reste maintenant à en étudier le fonctionnement au point de vue théorique, afin de chercher à déduire de cette étude quelques principes pouvant servir de guide pour l'établissement rationnel d'une machine.

Calcul de la force électromotrice dans les machines à courants continus. — Au point de vue de leur mode de fonctionnement, on pourrait employer, pour les machines, une autre classification que celle qui nous a servi pour leur description et les diviser en deux catégories comprenant, d'une part, les machines à collecteur dans lesquelles l'induit forme un circuit continu fermé sur lui-même (Gramme, Siemens, etc.), et, d'autre part, les machines à commutateur (Brush, Stanley, etc.), dans lesquelles le circuit induit n'est pas fermé sur lui-même. Nous nous occuperons surtout des premières, qui sont de beaucoup les plus importantes.

Une machine de ce genre comprend, comme nous l'avons vu : 1° un ou plusieurs aimants fixes, constituant les inducteurs et pouvant être, soit des aimants permanents, soit des électro-aimants; 2° un circuit conducteur que nous désignerons sous le nom de *spirale mobile,* enroulé sur un noyau de fer doux. Cette spirale mobile, qui est fermée, est partagée en un certain nombre de subdivisions ou bobines, dont chacune est reliée à une lame d'un collecteur. Remarquons d'abord que s'il s'agit d'un induit Gramme, Siemens, etc., le noyau de fer doux étant identique à lui-même dans toutes ses positions, nous pouvons, pour simplifier, le supposer fixe,

pendant que la spirale mobile seule se déplace autour de lui ; cette disposition a même été employée dans les premières machines dynamo-électriques de Siemens.

Quoi qu'il en soit, lorsque la machine fonctionne, ce noyau de fer se trouve aimanté pour deux raisons, d'abord parce qu'il est influencé par les aimants inducteurs, et ensuite parce que la spirale mobile qui l'entoure est parcourue par un courant. Il en résulte que la spirale mobile se trouve soumise à trois effets d'induction : 1° action de l'inducteur fixe ; 2° action du noyau magnétisé dont les pôles restent, dans tous les cas, immobiles dans l'espace ; 3° induction de la spirale sur elle-même.

Quelle que soit la position de la spirale mobile, elle est partagée par les balais en deux parties, que l'on peut considérer comme deux circuits dérivés par rapport au circuit extérieur pris comme circuit principal ; et, comme les points de contact des balais sont situés aux extrémités d'un même diamètre perpendiculaire aux lignes de force du champ magnétique, ces deux parties sont égales. Il s'agit donc, pour avoir la force électromotrice moyenne, de considérer une des moitiés de l'anneau, c'est-à-dire le déplacement d'une bobine pendant une demi-révolution. Prenons d'abord le déplacement élémentaire d'une subdivision pendant le temps dt ; soit e la force électromotrice d'induction produite par les inducteurs et le noyau, dans cette subdivision. Nous avons trouvé (p. 76), pour l'équation générale de l'induction,

$$e = \frac{\mathrm{H}s}{dt}$$

ou, en représentant par $d\varpi$ le produit $\mathrm{H}s$,

$$e = \frac{d\varpi}{dt}.$$

Si l'intensité H du champ magnétique n'est pas la même en tous les points de l'espace, on peut toujours la supposer

constante pour le déplacement élémentaire considéré; elle sera seulement variable d'un déplacement à l'autre, de sorte que, pour avoir la somme des forces électromotrices développées pendant un temps fini, il faudra prendre l'intégrale $\int \frac{d\varpi}{dt} dt$ entre les limites correspondant à la période de temps considérée.

Ceci posé, soient ϖ' et ϖ'' les valeurs de ϖ au commencement et à la fin de la demi-révolution considérée. Soient t' l'instant où commence cette demi-révolution, et t'' l'instant où elle finit. Si v est le nombre de tours pendant l'unité de temps, la durée d'un tour est $\frac{1}{v}$, la durée d'un demi-tour $\frac{1}{2v}$; donc

$$t'' = t' + \frac{1}{2v}.$$

La somme des forces électromotrices développées dans une même subdivision pendant une demi-révolution est

$$\int_{t'}^{t''} \frac{d\varpi}{dt} dt;$$

par suite on a, pour la force électromotrice moyenne,

$$e_1 = \frac{1}{\frac{1}{2v}} \int_{t'}^{t''} \frac{d\varpi}{dt} dt = 2v(\varpi'' - \varpi'),$$

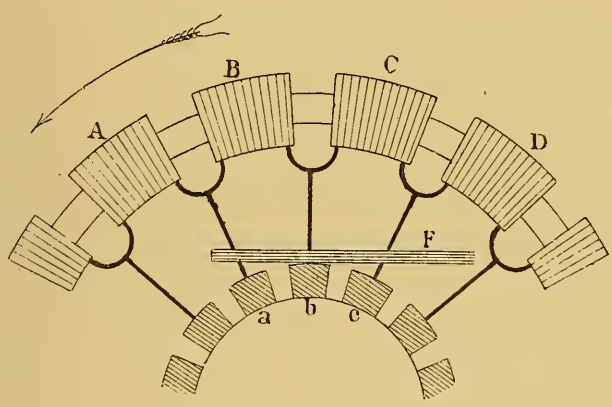
et enfin, si n est le nombre total des subdivisions, ce qui en fait $\frac{n}{2}$ pour le demi-anneau, la force électromotrice totale est

$$E_1 = \frac{n}{2} e_1 = nv(\varpi'' - \varpi').$$

Il importe de remarquer ici que le produit $d\varpi$ est proportionnel à la longueur du fil contenu dans une subdivision; il en résulte que, si l'on conserve toujours la même longueur totale du fil pour la spirale mobile, en faisant varier le nombre des subdivisions, $d\varpi$ est proportionnel à $\frac{1}{n}$: il en sera de même de ϖ'' et de ϖ'; donc E_1 est indépendant de n.

Examinons maintenant l'action que le conducteur mobile exerce sur lui-même. Ce conducteur se déplaçant dans son ensemble, les diverses parties ne changent pas leurs positions relatives; le mouvement ne peut donc pas engendrer d'induction réciproque de ces différentes parties. Il n'y a par suite à s'occuper que de l'induction qui peut provenir des variations du courant : pour une subdivision en particulier, ces variations consistent en un changement de sens du courant, chaque fois qu'elle passe devant un balai, c'est-à-dire deux fois par tour. Pour nous rendre compte de la façon dont s'opère ce changement de sens, représentons en A, B, C, D (*fig.* 41) les subdivisions de l'anneau, et en *a*, *b*, *c* les

Fig. 41.



lames du collecteur qui réunissent le fil sortant d'une bobine avec le fil entrant de la suivante. Soit F le balai, le mouvement ayant lieu dans le sens indiqué par la flèche. Considérons une bobine lorsqu'elle est en C; la lame *b* touchant seule le frotteur, la bobine considérée appartient tout entière à la portion droite de l'anneau; le mouvement continuant, il arrive un instant où le frotteur, sans quitter encore la lame *b*, touche la lame *c*; il y a donc une période pendant laquelle la bobine C est fermée sur elle-même. Enfin le frotteur cesse de toucher *b* et alors la bobine fait partie de la portion gauche de l'anneau. Or le changement de courant a lieu lorsque la bobine traverse

le plan passant par l'axe et le point de contact du balai, plan qui est vertical sur la figure ; de plus, les intervalles entre deux lames consécutives du collecteur correspondent aux milieux des bobines. Il en résulte que le changement de courant commence pendant la période de fermeture.

Il n'y a pas lieu évidemment de se préoccuper des effets d'induction dans la bobine pendant ce temps ; car, tant que la bobine est fermée sur elle-même, elle peut être considérée comme n'appartenant plus au circuit général. Quant à l'effet produit sur les autres subdivisions, celles-ci étant symétriques par rapport à la première, les forces électromotrices induites sont les mêmes des deux côtés, et, comme elles sont de sens contraires, elles se contrebalancent dans le circuit général.

Il ne reste donc à considérer que la dernière période pendant laquelle la bobine, tout en faisant partie du circuit de gauche, n'a pas encore complètement franchi le plan vertical de séparation. Dans ce cas, il faut tenir compte à la fois de l'induction de la subdivision sur elle-même et de l'induction qu'elle produit sur les autres subdivisions ; car, d'une part, la subdivision considérée fait partie du circuit général et, d'autre part, il n'y a plus symétrie de chaque côté d'elle, puisque d'un côté elle touche à une subdivision fermée sur elle-même par le balai, mise par conséquent hors circuit, tandis que de l'autre côté elle touche à une subdivision faisant partie du circuit général. Il y aura donc, de ce chef, dans le circuit général, une nouvelle force électromotrice E_2 qui sera de signe contraire à E_1 ; cette quantité E_2 représentant la force électromotrice d'induction d'une subdivision sur elle-même et sur les $n - 1$ autres, c'est-à-dire l'action d'une subdivision sur les n bobines de l'anneau, il faudrait pouvoir calculer la force électromotrice moyenne e_2 ; d'où l'on déduirait

$$E_2 = ne_2.$$

Il est assez difficile de déterminer par le calcul la valeur

exacte de e_2; nous pouvons toutefois remarquer que cette quantité, représentant la force électromotrice de deux bobines l'une sur l'autre, doit être proportionnelle à la longueur du fil de chacune d'elles, c'est-à-dire à $\frac{1}{n^2}$; il en résulte que E_2 est proportionnelle à $\frac{1}{n}$.

La force électromotrice résultante est

$$E = E_1 - E_2;$$

on voit qu'elle est la différence de deux quantités dont la première E_1 est indépendante de n, tandis que la seconde E_2 est proportionnelle à $\frac{1}{n}$; on augmentera donc E en augmentant le nombre des subdivisions de l'anneau.

Une machine sera donc d'autant meilleure qu'elle renfermera un plus grand nombre de lames au collecteur. Cette disposition aura encore un autre avantage : d'après la manière dont s'établissent les contacts des balais avec le collecteur, on voit que le courant qui parcourt le circuit intérieur n'est jamais nul, mais que son intensité est variable pendant le temps qu'une bobine met à se substituer à la précédente et, si le mouvement est uniforme, l'intensité passe périodiquement par les mêmes valeurs; par conséquent, plus le nombre des bobines sera grand, plus la durée de cette période sera courte et plus on se rapprochera d'un courant constant et comparable au courant fourni par une pile. Dans la pratique, la durée de la période est très courte; avec une machine Gramme renfermant soixante bobines et faisant neuf cents tours par minute, cette durée est de $\frac{1}{900}$ de seconde; on peut donc considérer le courant comme constant, et un galvanomètre placé dans le circuit extérieur indique une intensité constante. Mais les variations d'intensité n'en existent pas moins, et, si l'on remplace le galvanomètre par un téléphone, ces variations sont mises en évidence par le son que fait entendre le téléphone.

Dans une machine magnéto-électrique, il n'y a pas d'autres actions que celles que nous venons d'analyser; mais, lorsqu'on a une machine dynamo-électrique, on peut se demander s'il ne se produit pas d'effets d'induction résultant de l'action du courant qui parcourt les bobines mobiles sur le circuit fixe des inducteurs. Pour éclaircir ce point, appliquons le même raisonnement que ci-dessus, et soit $\varepsilon = \frac{dU}{dt}$ la force électromotrice d'induction produite dans une portion du circuit fixe par le déplacement d'une bobine. On trouvera, comme précédemment, pour la somme des forces électromotrices produites par l'action d'une bobine, pendant un déplacement dont la durée est $t'' - t'$,

$$\int_{t'}^{t''} \varepsilon\, dt = \int_{t'}^{t''} \frac{dU}{dt}\, dt.$$

Ici les deux moitiés de l'anneau ne se comportent pas de même; il faudra alors considérer une révolution entière, et prendre pour le temps $t'' - t'$ la durée $\frac{1}{v}$ d'une révolution. La force électromotrice moyenne sera donc

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\frac{1}{v}} \int_{t'}^{t''} \frac{dU}{dt}\, dt = v(U'' - U').$$

Or, après un tour entier, il est clair que les choses se retrouvent dans le même état qu'au commencement; donc $U'' = U'$ et, par suite, $\varepsilon_1 = 0$. Il n'y aura donc aucune force électromotrice induite dans le conducteur fixe [1].

Bien qu'on ne puisse pas évaluer complètement la force électromotrice E_2, nous pouvons cependant admettre qu'elle est proportionnelle à l'intensité i du courant. D'autre part,

---

[1] Cette démonstration et celles qui précèdent sont extraites d'un Mémoire de Clausius publié dans le t. VII de la *Lumière électrique*.

elle est proportionnelle à la vitesse v, puisqu'elle dépend du nombre de renversements du courant dans un temps donné; nous pouvons donc écrire

$$E_2 = kiv,$$

k étant un coefficient dépendant de la construction de la machine; on aura alors

$$E = E_1 - E_2 = nv(w'' - w') - kiv.$$

Les quantités w'' et w' ne dépendent que de l'intensité du courant; par conséquent, si l'on fait varier la vitesse de rotation de l'anneau en maintenant l'intensité constante, la force électromotrice varie proportionnellement à la vitesse. Ce fait, énoncé et vérifié expérimentalement par M. Marcel Deprez, a été contesté par M. Maurice Lévy qui présentait l'objection suivante : Lorsqu'on fait tourner l'anneau induit dans le champ magnétique, le noyau tournant en même temps que la spirale mobile, il se produit des courants d'induction, non seulement dans la spirale, mais aussi dans le noyau lui-même. Ces derniers courants agissent à leur tour pour modifier le champ magnétique, de sorte que finalement la force électromotrice de la machine doit être représentée, non pas par un terme proportionnel à la vitesse, mais par une série ordonnée suivant les puissances croissantes de la vitesse.

Au point de vue mathématique, le raisonnement de M. Maurice Lévy est exact; mais, au point de vue pratique, l'expérience montre que, au moins pour les machines employées jusqu'à présent, les termes de la série autres que le premier sont négligeables. On peut par suite admettre que, pour une même intensité de courant, la force électromotrice d'une machine est proportionnelle à sa vitesse.

Déficit dans la transformation du travail mécanique en travail électrique. — Néanmoins ces courants produits dans le noyau existent et, s'ils n'agissent pas pour altérer

d'une manière appréciable la loi de proportionnalité que nous venons d'énoncer, ils ont du moins pour résultat d'affaiblir un peu le rendement de la machine. On sait que, d'une manière générale, si l'on déplace une masse métallique dans un champ magnétique, il se produit, dans cette masse, des courants dont l'existence a été mise en évidence par les expériences bien connues d'Arago et de Foucault. Ces courants, que l'on désigne, assez improprement d'ailleurs, sous le nom de *courants de Foucault,* doivent donc aussi se produire dans le noyau en fer de l'anneau et, comme ils ne sont pas recueillis, il en résulte que l'énergie électrique, représentée en chevaux-vapeur par $\frac{Ei}{75g}$, est plus faible que le travail mécanique absorbé. Il y a donc là un déficit qui, pour les bonnes machines, varie de 5 à 10 pour 100; on voit en somme que, malgré ce déficit, les machines électriques, envisagées comme transformateurs d'énergie, ont un rendement bien supérieur aux autres appareils, notamment aux machines à vapeur. C'est afin de diminuer ce déficit provenant des courants de Foucault que l'on a cherché à diviser le fer du noyau en le constituant non pas par un anneau massif, comme celui de Pacinotti, mais par un ensemble de fils de fer, de plaques de tôle, de rubans de fer, etc., dont les différentes parties sont isolées autant que possible les unes des autres.

Du reste, il n'est pas prouvé que le déficit que nous venons de signaler soit dû uniquement aux courants de Foucault; lorsque le noyau se déplace, les lignes de force du champ magnétique occupent toujours la même position dans l'espace; mais les molécules du noyau se déplacent par rapport à ces lignes de force et il en doit résulter un travail analogue au frottement, qui absorbe une certaine quantité d'énergie. Lorsqu'il y a dans le noyau un renversement complet de polarité, comme cela a lieu dans la bobine à double T de Siemens, cette perte d'énergie est encore plus considérable et est mise en évidence par l'échauffement du noyau.

Étude expérimentale des machines. Caractéristique. — Les considérations qui précèdent ne suffisent pas pour déterminer toutes les conditions de fonctionnement d'une machine électrique. Les formules qui permettraient de faire cette étude d'une manière complète seraient compliquées et, en admettant qu'on pût poser toutes les équations du problème, on se trouverait bientôt arrêté, pour les résoudre, par des difficultés de calcul insurmontables dans l'état actuel de nos connaissances. Telles qu'elles sont, ces équations peuvent conduire à des remarques intéressantes et nous venons de voir, pour un cas particulier, le parti qu'on en peut tirer. La conséquence de cette remarque, c'est que, pour poursuivre nos études sur le mode de fonctionnement des machines, il faut forcément nous adresser à l'expérience.

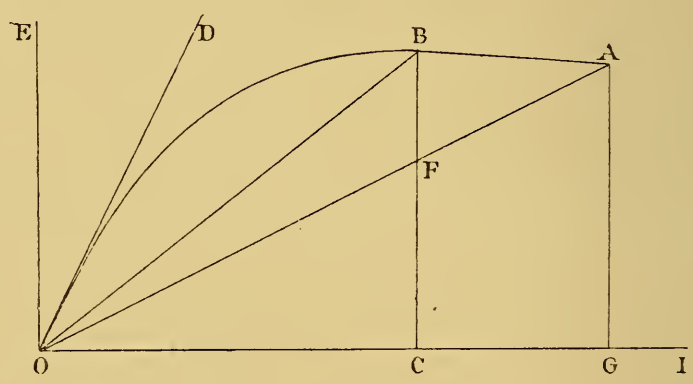
Cette étude expérimentale a été faite par M. Marcel Deprez au moyen de courbes qu'il désigne sous le nom de *caractéristiques* et qui, comme on va le voir, permettent de se rendre compte des principales propriétés des machines.

Considérons une machine dynamo-électrique reliée à un circuit extérieur inerte et faisons tourner son anneau avec une vitesse V. Soit R la résistance totale du circuit, comprenant par conséquent la résistance extérieure et la résistance de la machine ; mesurons l'intensité correspondante I : la force électromotrice E de la machine sera $E = RI$; nous pourrons donc la calculer. Supposons maintenant que, sans changer la vitesse V, nous fassions varier la résistance extérieure, R variera ainsi que I et E, et nous pourrons construire une courbe ayant pour abscisses les valeurs de I et pour ordonnées les valeurs correspondantes de E ; cette courbe est la caractéristique de la machine, considérée pour la vitesse V. Il y aura donc autant de caractéristiques que de valeurs de V ; mais il suffit d'en déterminer une et, lorsqu'on a obtenu la caractéristique qui correspond à la vitesse V, on peut en déduire facilement celle qui correspond à une vitesse quelconque V'. En effet, supposons les deux courbes tracées avec

les mêmes axes, et considérons deux points ayant même abscisse; les ordonnées de ces deux points seront les valeurs de la force électromotrice correspondant aux vitesses V et V′, avec une même intensité du courant. D'après la loi de proportionnalité que nous avons admise ci-dessus, le rapport de ces valeurs est $\frac{V'}{V}$, c'est-à-dire que, lorsqu'on aura construit la caractéristiqne V, on en déduira immédiatement la caractéristique V′, en multipliant par $\frac{V'}{V}$ les ordonnées de la première courbe.

Propriétés de la caractéristique. Désamorcement. — Représentons en OA (*fig.* 42) la caractéristique d'une ma-

Fig. 42.



chine pour une vitesse V. Lorsque l'intensité est représentée par OC, la force électromotrice est représentée par BC; on en déduit immédiatement la valeur de la résistance correspondante R du circuit total. En effet,

$$R = \frac{E}{I} = \frac{BC}{OC} = \text{tang}\,BOC.$$

On voit alors que, si l'on fait croître la résistance, ce qui revient à faire tourner la ligne OB autour du point O, en la relevant, la force électromotrice diminue en même temps que l'intensité et, lorsque la ligne OB vient occuper la posi-

tion OD tangente à la courbe en O, on a $I = 0$, $E = 0$; il n'y a donc plus de courant et il en sera de même pour toutes les valeurs de R supérieures à tang DOC.

Ainsi un premier examen de la caractéristique nous conduit immédiatement à une propriété importante des machines dynamo-électriques : c'est que, à une vitesse donnée, il existe pour la résistance du circuit une limite supérieure au delà de laquelle la machine ne donne pas de courant; elle ne s'amorce pas. Ce fait étant ainsi mis en évidence peut être déduit directement du principe de l'excitation des machines dynamo-électriques. Pour nous en rendre compte, nous pouvons poser la question de la manière suivante : étant donnée une machine qui, à un instant déterminé t, possède une force électromotrice e correspondant à un courant d'intensité $i = \frac{e}{R}$, trouver la condition pour qu'elle ne se désamorce pas. Cette condition est évidemment qu'à l'instant $t + dt$ la force électromotrice soit au moins égale à e. Nous avons vu que la force électromotrice d'une machine comprend deux termes $E_1 - E_2$, dont le deuxième diminue quand on augmente le nombre des lames au collecteur. Admettons qu'elles soient assez nombreuses pour qu'on puisse négliger E_2, de sorte que la force électromotrice est proportionnelle à l'intensité du champ magnétique et à la vitesse V. Or, pendant le temps dt, le champ magnétique est produit par le courant i. Si l'on admet que l'intensité du champ est proportionnelle à i, on pourra écrire, pour la valeur de la force électromotrice à l'instant $t + dt$,

$$e' = kiV;$$

la condition à remplir $e' \geqq e$ devient donc

$$kiV \geqq Ri \quad \text{ou} \quad \frac{kV}{R} \geqq 1.$$

Si cette condition est remplie, la machine reste amorcée; si elle ne l'est pas, la force électromotrice et par suite l'intensité vont en décroissant et la machine se désamorce.

Il est à remarquer que la condition qui précède est indépendante de la valeur de e; toutefois le raisonnement suppose que cette valeur n'est pas nulle. En réalité, cela n'aura jamais lieu; le cas où $e = 0$ représente une sorte d'équilibre instable qui ne peut être réalisé pratiquement. On peut donc affirmer qu'en mettant la machine en mouvement, il se produira, dans un sens ou dans l'autre, une force électromotrice qui, si faible qu'elle soit, suffira à produire l'amorçage dans le même sens, exactement comme on peut affirmer qu'on obtiendra toujours un courant induit en déplaçant un circuit fermé dans un champ magnétique. Le plus souvent, du reste, cette force électromotrice primitive sera due au magnétisme rémanent des inducteurs.

Lorsque $\frac{kV}{R} > 1$, il semble que la force électromotrice doive augmenter indéfiniment; l'expérience montre qu'il n'en est rien et, au bout de quelques instants, la machine a atteint un régime permanent. Cela tient à ce que le coefficient k n'est pas indépendant de i; en réalité, l'intensité du champ croît moins vite que celle du courant, de sorte que k diminue lorsque i augmente. Il arrive par suite un moment où $\frac{kV}{R} = 1$ et, à partir de cet instant, les valeurs de e et de i cessent de croître.

Dans une machine magnéto-électrique le phénomène que nous venons de signaler ne se produit pas; en effet, la force électromotrice ne dépendant que du champ magnétique et de la vitesse qui sont constants est elle-même constante, de sorte que dans ce cas la caractéristique est théoriquement une droite parallèle à l'axe des x, qui donne seulement $I = 0$ pour $R = \infty$.

La caractéristique permet également de déterminer la différence de potentiel e entre deux points quelconques du circuit. Considérons deux points comprenant entre eux la résistance x; soit r la résistance du reste du circuit qui contient la machine, de sorte que $R = r + x$. Menons OB et

OA, telles que

$$\text{tang}\,\text{BOC} = r + x \quad \text{et} \quad \text{tang}\,\text{AOC} = r.$$

On a

$$\text{BC} = \text{OC}\,\text{tang}\,\text{BOC} = \text{I}(r + x),$$
$$\text{FC} = \text{OC}\,\text{tang}\,\text{AOC} = \text{I}r;$$

donc

$$\text{BF} = \text{BC} - \text{FC} = \text{I}x = e.$$

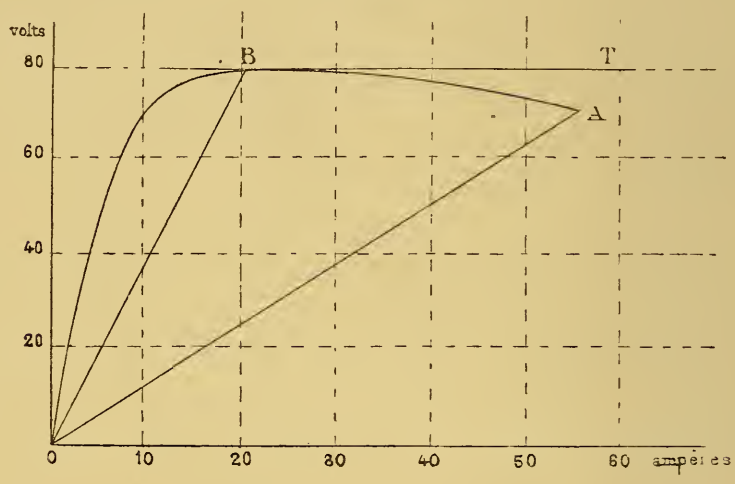
Si, en particulier, r est la résistance intérieure de la machine, BF représente la différence de potentiel aux bornes; on voit qu'elle est nulle, pour $x = 0$, quand OB coïncide avec OA. Si l'on fait croître x, elle passera par un maximum pour revenir à 0, lorsque la machine se désamorcera. On obtiendrait le maximum de e en menant à la caractéristique une tangente parallèle à OA.

Les expériences de M. Marcel Deprez ont porté sur les principaux types de machines connus et ont montré que, pour la plupart d'entre elles, à partir d'une certaine valeur de I, la caractéristique, qui avait d'abord affecté une forme parabolique, s'abaisse en se rapprochant de l'axe des x, comme l'indique la *fig.* 43 qui représente la caractéristique de la machine Gramme, type d'atelier à la vitesse de 950 tours. Menons la ligne OA, telle que tang AOX représente la résistance intérieure de la machine, qui est de $1^{\text{ohm}},02$; menons également la tangente BT parallèle à l'axe des x. Il est clair que, si la résistance extérieure est telle que la résistance totale soit comprise entre tang AOX et tang BOX, la machine fonctionnera dans de mauvaises conditions, puisque la différence de potentiel aux bornes ira en diminuant avec la résistance extérieure. On a donc tout intérêt à éviter cet abaissement de la caractéristique que M. Marcel Deprez a expliqué de la façon suivante.

Tant que l'intensité est faible, les inducteurs sont loin de leur point de saturation et l'intensité du champ magnétique augmente avec celle du courant; la force électromotrice

croît avec la même rapidité et la caractéristique se présente d'abord sous la forme d'une droite passant par l'origine. Au fur et à mesure que l'on s'approche du point de saturation des inducteurs, l'intensité du champ magnétique et par suite la force électromotrice croissant moins vite que l'intensité du courant, la caractéristique s'infléchit et, lorsque les inducteurs sont saturés, la force électromotrice n'augmente plus avec l'intensité. On se trouve dans le cas d'une machine

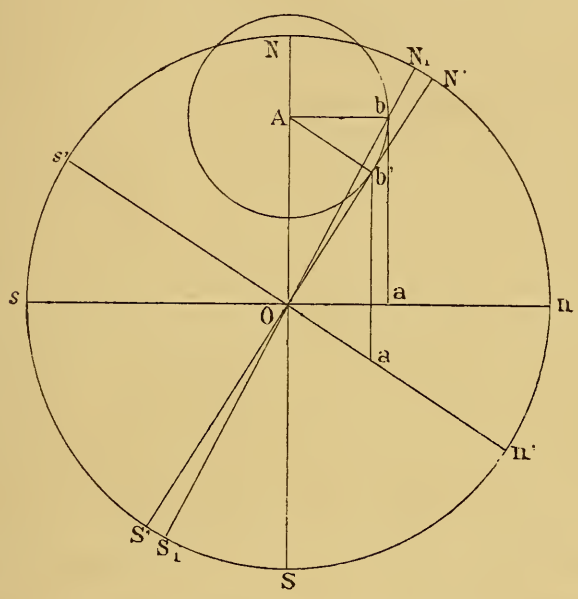
Fig. 43.



magnéto-électrique et la courbe est parallèle à l'axe des x. Si, maintenant, on continue à faire croître l'intensité en diminuant la résistance, l'expérience montre que la courbe ne reste pas parallèle à l'axe des x, mais, au contraire, s'en rapproche comme l'indique la *fig.* 43. Pour expliquer ce fait, représentons en O (*fig.* 44) l'axe de l'anneau et soit NS la ligne des pôles des inducteurs; supposons d'abord les balais placés en n et s, sur le diamètre perpendiculaire à NS. Si le courant passait seulement dans les inducteurs, ceux-ci produiraient dans le noyau de l'anneau deux pôles tels que N et S; l'axe magnétique de l'aimant ainsi produit serait NS; soit OA son moment magnétique. Si, au contraire, le courant passait seulement dans l'anneau, il transformerait celui-ci en

un électro-aimant dont les pôles seraient en n et s et dont le moment magnétique pourrait être représenté par Oa. Le courant circulant en réalité à la fois dans les inducteurs et dans l'anneau, le noyau se trouve soumis à deux actions dont la résultante Ob, intermédiaire entre OA et Oa, est obtenue par une construction analogue au parallélogramme des forces. Mais alors les balais seront mal placés, puisqu'ils

Fig. 44.



ne seront plus perpendiculaires à la ligne des pôles. Il faudra donc les avancer sur la perpendiculaire à $N_1 S_1$; ce déplacement des balais aura pour effet de déplacer de nouveau la ligne $N_1 S_1$, ce qui nécessitera un nouveau déplacement des balais et ainsi de suite, jusqu'à une position limite, telle que la ligne des balais $n's'$ soit perpendiculaire à la diagonale du parallélogramme construit sur OA et Oa' = Oa. Il est facile de voir que l'on obtiendra cette position en menant la ligne ON′ tangente à la circonférence décrite du point A comme centre, avec Ab = Oa pour rayon.

Par conséquent, pour une vitesse et une intensité de cou-

rant données, il existe une position déterminée de la ligne neutre aux extrémités de laquelle doivent se trouver les balais. Pour toute autre position, le renversement du courant se fait dans les bobines de l'induit, alors que le courant qui les parcourt n'est pas nul ; il en résulte des extra-courants qui se manifestent par des étincelles aux balais. Dans la pratique, on règle la position des balais, de manière à supprimer les étincelles au collecteur.

La *fig.* 44 nous montre, en outre, que $Ob' < OA$, c'est-à-dire que le courant qui parcourt la spirale mobile a pour effet de diminuer le magnétisme produit dans le noyau par les inducteurs. Nous avons donc en présence l'une de l'autre deux actions qui se contrarient; le seul moyen d'atténuer cet inconvénient, c'est de donner une très grande prépondérance à l'une des actions sur l'autre. Il y a théoriquement deux solutions : la première consiste à prendre des inducteurs très puissants, de manière à augmenter OA par rapport à Oa; la deuxième, qui a été proposée par M. Maurice Leblanc, conduit à supprimer complètement les inducteurs, pour n'utiliser que le magnétisme dû à l'anneau. La première solution a été seule employée jusqu'à présent.

Revenons maintenant à la caractéristique et continuons à faire croître l'intensité; on voit qu'à partir du moment où les inducteurs sont saturés, la longueur OA restera constante; mais Oa continuera à croître : donc le magnétisme de l'anneau et, par suite, la force électromotrice diminuent de plus en plus, ce qui explique l'abaissement de la caractéristique.

M. Marcel Deprez a vérifié ces déductions théoriques par les expériences suivantes : ayant pris une machine Gramme, il en excitait les inducteurs par un courant séparé ayant une intensité de beaucoup supérieure à celle qui était nécessaire pour saturer les inducteurs (la caractéristique de la machine montrant que la saturation était obtenue avec un courant de 35 ampères, on employait 80 ampères). L'anneau étant mis

en marche avec une vitesse constante, on faisait varier la résistance extérieure, de manière à obtenir une série de valeurs de I et E; on constatait alors qu'à partir d'une certaine valeur de I la force électromotrice allait en diminuant.

La deuxième expérience a consisté à renforcer les inducteurs d'une machine Gramme; dans ces conditions, on obtenait une caractéristique s'éloignant constamment de l'axe des x.

Nous voyons alors que les conclusions à tirer de ce qui précède sont les suivantes : 1° il est nécessaire de régler le calage des balais pour chaque valeur de l'intensité et de la vitesse; 2° on doit augmenter autant que possible les dimensions des inducteurs, de manière à obtenir un champ magnétique intense, tout en restant au-dessous du point de saturation.

La première condition est facile à remplir : aussi toutes les machines sont-elles maintenant munies de balais à calage variable, que l'on règle de manière à supprimer les étincelles aux points de contact. La deuxième condition nous montre qu'il faut augmenter les dimensions des inducteurs par rapport à l'induit; mais il est clair qu'au delà d'une certaine limite cette augmentation n'est plus nécessaire, et comme, dans la pratique, il faut faire intervenir la question de prix, on voit qu'à partir d'un certain moment la dépense résultant de l'emploi de quantités de métal de plus en plus grandes ne serait plus compensée par les avantages qu'on en tirerait. Ici encore, la théorie est impuissante et l'étude de la caractéristique ne permet pas de trouver *a priori* la solution du problème; il faudrait, pour cela, connaître les relations qui existent entre cette courbe et les différents organes de la machine. Les considérations qui précèdent n'en sont pas moins précieuses pour cela; car, outre qu'elles ont montré comment on pourrait corriger certaines machines défectueuses, elles ont permis d'arriver, par une suite de tâtonnements méthodiques, à réaliser des machines qui ne laissent

presque rien à désirer au point de vue de la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. C'est ainsi que la machine Marcel Deprez, que nous avons décrite (p. 177), a un rendement assez voisin de l'unité, pour que la différence soit de l'ordre de grandeur des erreurs commises dans les mesures.

Dimensions à donner aux machines. — D'après ce que nous venons de dire, le problème de l'établissement d'une machine est indéterminé en ce qui concerne le type à adopter, c'est-à-dire le mode de répartition des métaux, fer et cuivre, entre l'induit et les inducteurs. Nous sommes donc forcés d'admettre que c'est l'expérience seule qui a permis d'arrêter la forme et la disposition des divers organes. Quant aux dimensions à adopter, il est évident qu'elles ne sont pas arbitraires; car, si, d'une part, il y a avantage, au point de vue économique, à employer de petites machines, c'est-à-dire de petites quantités de métal, d'autre part, les conditions de sécurité pour l'appareil ne permettent pas de dépasser certaines limites. En effet, si, en réduisant les dimensions de la machine, on veut maintenir le diamètre du fil, il faudra, pour avoir la même force électromotrice, augmenter la vitesse qui pourra alors devenir dangereuse au point de vue de l'échauffement des coussinets, des effets de la force centrifuge, etc. D'un autre côté, si l'on veut maintenir la même longueur de fil, on sera conduit à lui donner une section très faible et l'échauffement produit par le passage du courant pourra compromettre les isolants. On ne devra donc pas, dans la pratique, dépasser certaines valeurs pour la vitesse circonférentielle de l'anneau et l'intensité par millimètre carré de section des fils. C'est encore l'expérience qui fera connaître ces valeurs limites.

Il y a une autre raison pour prendre des machines ayant des dimensions aussi grandes que possible : c'est que le rapport entre le travail utile et le travail total dépensé

augmente avec les dimensions. Pour nous en rendre compte, appelons E la force électromotrice, r la résistance intérieure et i l'intensité du courant, intensité qui est déterminée par les besoins du circuit extérieur. Admettons, comme précédemment, que le nombre des lames du collecteur est assez grand pour que l'on puisse négliger le second terme de la force électromotrice E, de sorte que celle-ci sera proportionnelle : 1° à l'intensité du courant qui parcourt les inducteurs et qui est égale à i, s'il s'agit d'une machine ayant ses inducteurs disposés en série dans le circuit général; 2° à la longueur l_1 du circuit inducteur; 3° à la longueur l_2 du circuit induit; 4° à la vitesse v. Nous pourrons donc écrire

$$(1) \qquad E = kivl_1l_2,$$

k étant un coefficient qui dépend de la construction de la machine. Le travail total dépensé est Ei et, pour avoir le travail utile, il faut en retrancher le travail employé à échauffer les circuits de la machine. Soient r_1, r_2 les résistances de l_1 et l_2; posant $r_1 + r_2 = r$, le travail perdu est ri^2. Appelons enfin m le rapport du travail perdu au travail total, on a

$$m = \frac{ri^2}{Ei} = \frac{ri}{E} = \frac{r}{kvl_1l_2}.$$

Cherchons maintenant ce que devient ce rapport m, lorsque, conservant la machine semblable à elle-même, on augmente toutes les dimensions dans le même rapport α.

Soient A_1 le volume du fil de l'inducteur dans la première machine, s sa section et c le coefficient de conductibilité du cuivre ; on a

$$r_1 = \frac{l_1}{cs} = \frac{A_1}{cs^2}.$$

Dans la machine agrandie, le volume du fil inducteur est $\alpha^3 A_1$, sa section est $\alpha^2 s$; donc sa nouvelle résistance est

$$R_1 = \frac{\alpha^3 A_1}{c\,\alpha^4 s^2} = \frac{1}{\alpha} r_1.$$

On aura de même, pour la résistance de l'induit,

$$R_2 = \frac{1}{\alpha} r_2$$

et, pour la résistance totale de la nouvelle machine,

$$R = \frac{1}{\alpha} r.$$

Enfin les longueurs l_1 et l_2 sont devenues respectivement égales à αl_1 et αl_2; donc la nouvelle valeur du rapport m sera

$$M = \frac{\frac{1}{\alpha} r}{kv\alpha^2 l_1 l_2} = \frac{1}{\alpha^3} m,$$

c'est-à-dire que, lorsqu'on augmente les dimensions de la machine, le rapport du travail perdu au travail total diminue comme le cube de α. Il faut remarquer, en outre, que la vitesse v est la vitesse circonférentielle de l'anneau, de sorte que, si l'on augmente les dimensions de la machine dans le rapport α, la vitesse angulaire se trouve diminuée dans le même rapport.

Au lieu d'augmenter dans le rapport α toutes les dimensions de la machine primitive, ce qui revient à employer une quantité de métal α^3 fois plus grande, on aurait pu prendre α^3 machines identiques à la première et les accoupler ensemble. Proposons-nous de comparer cette solution à la précédente, et, pour cela, remarquons que l'on peut grouper les machines de deux manières, en tension ou en quantité, comme on le fait pour des éléments de pile. Dans le premier cas, elles sont disposées bout à bout, le pôle + de l'une étant relié au pôle — de la suivante, de sorte que les forces électromotrices s'ajoutent. Dans le deuxième cas, on réunit ensemble tous les pôles + et tous les pôles —. Supposons p groupes de n machines réunies en tension dans chaque groupe, les p groupes étant réunis en quantité, et soit i l'intensité dans le circuit

extérieur. On a

$$np = \alpha^3.$$

La force électromotrice de chaque groupe est $nki'vl_1 l_2$; c'est aussi la force électromotrice totale. Or $i' = \frac{i}{p}$: donc le travail total est

$$\frac{n}{p} ki^2 vl_1 l_2.$$

La résistance de chaque groupe est nr; donc la résistance totale des machines est

$$\frac{n}{p} r.$$

Le travail perdu est alors

$$\frac{n}{p} ri^2,$$

d'où enfin

$$M = \frac{r}{kv\, l_1 l_2} = m;$$

c'est-à-dire que le rapport du travail perdu au travail total ne change pas avec le nombre des machines employées. Il en résulte que la disposition qui consiste à employer α^3 machines identiques est moins avantageuse que celle qui consiste à employer la même quantité de métal pour former une seule machine α fois plus grande. Ce fait a été démontré pour la première fois par M. Marcel Deprez.

D'autre part, il est évident que les difficultés de construction augmentent avec les dimensions de la machine ; il y a donc encore là une limite imposée par la pratique, limite qui sera plus ou moins reculée, suivant les ressources dont disposera le constructeur.

Résistances à donner aux inducteurs et à l'induit. — On sera ordinairement conduit, pour les raisons que nous avons indiquées, à fixer la résistance intérieure de la machine, d'après le travail qu'elle doit fournir, de manière qu'elle ne soit pas soumise à une vitesse exagérée et qu'elle ne s'échauffe

pas trop. La résistance r étant admise, on peut alors se demander comment on devra la répartir entre les résistances r_1 et r_2 des inducteurs et de l'induit. Sir William Thomson a donné la solution de cette question de la manière suivante.

La répartition la plus avantageuse sera évidemment celle qui rendra minimum le rapport m. Or on a

$$r_1 = \frac{l_1}{cs}$$

ou, en remplaçant s par sa valeur $\frac{A_1}{l_1}$,

$$r_1 = \frac{l_1^2}{cA_1},$$

d'où

$$l_1 = \sqrt{cA_1 r_1}.$$

Nous aurons donc

$$m = \frac{r}{kvc\sqrt{A_1 A_2}\sqrt{r_1 r_2}}.$$

Si l'on admet que dans cette expression les seules quantités variables sont r_1 et r_2, dont la somme est constante, on voit que le minimum de m correspond à $r_1 = r_2$.

En réalité, le coefficient k n'est pas absolument constant, lorsqu'on fait varier les quantités r_1 et r_2 tout en maintenant leur somme égale à r. L'expérience montre que, si l'on fait croître r_1 en diminuant r_2, k diminue ; par conséquent, le minimum de m a lieu pour une valeur de r_1, un peu inférieure à celle de r_2, c'est-à-dire que, dans la pratique, on donnera aux inducteurs une résistance un peu plus faible que celle du circuit induit [1].

---

[1] Il est important de remarquer que la valeur de r_2, ainsi déterminée pour le circuit induit, n'est pas la résistance de la spirale mobile supposée déroulée : c'est la résistance de cette spirale mesurée entre les deux balais et qui doit être calculée par la formule de Kirchhoff. Il est facile de voir que la résistance de la spirale développée serait égale à $4r_2$.

Cette remarque montre également que chaque spire du circuit induit est

Nous avons admis que la résistance intérieure r de la machine était déterminée par les conditions de travail extérieur. Il va sans dire que, dans la pratique, ces conditions de travail peuvent elles-mêmes varier entre certaines limites, de sorte que les résultats du calcul ne peuvent pas être appliqués d'une façon rigoureuse; il est bon néanmoins de les connaître, afin de s'en écarter le moins possible.

Soit ρ la résistance extérieure; le travail total étant Ei, le travail extérieur utilisé est ρi^2, le travail perdu est ri^2. Supposons que, ces différents travaux restant les mêmes, on modifie la résistance ρ dans un rapport α, de sorte qu'elle devienne $\rho' = \alpha\rho$. Si l'on veut que le travail extérieur ne change pas, il est évident qu'on devra adopter, pour l'intensité du courant, une nouvelle valeur i', telle que $\rho' i'^2 = \rho i^2$; d'où

$$i' = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} i.$$

D'autre part, si l'on veut que le travail perdu ne change pas non plus, il faudra modifier la résistance de la machine et prendre pour r une nouvelle valeur $r' = \alpha r$. La formule (1) peut s'écrire, en remplaçant l_1 et l_2 par leurs valeurs et supposant $r_1 = r_2 = \frac{r}{2}$

$$E = \frac{k\sqrt{A_1 A_2}}{2} cvir.$$

Dans la nouvelle machine elle sera donc

$$E' = \frac{k\sqrt{A_1 A_2}}{2} cvi' r' = \frac{k\sqrt{A_1 A_2}}{2} cvir\sqrt{\alpha},$$

c'est-à-dire que, le travail électrique restant le même, la force électromotrice augmente avec la résistance de la machine. Il faut bien remarquer toutefois que le raisonnement précédent

---

parcourue seulement par la moitié du courant; il faut en tenir compte lorsqu'on détermine l'intensité par unité de section dans les diverses parties du circuit.

suppose c invariable ; par conséquent, l'augmentation de résistance doit être due uniquement à un accroissement de longueur du fil (ce qui entraîne une diminution de sa section), et non pas à une diminution de son coefficient de conductibilité. Il y aurait au contraire tout avantage à augmenter c, car on pourrait alors obtenir la même valeur de la résistance avec un fil plus long.

Il faut encore remarquer que, quand on fait varier le diamètre du fil enroulé dans un espace donné, sa longueur ne varie pas exactement en raison inverse de la section ; car les intervalles inoccupés entre les spires sont d'autant plus grands que le fil est plus gros. Pour remédier à cet inconvénient, Sir William Thomson a proposé d'employer des fils à section carrée ; mais il ne paraît pas jusqu'à présent que les difficultés de fabrication de pareils fils aient été compensées par les avantages que présente leur emploi.

Du rôle du fer dans les machines. — Jusqu'à présent nous nous sommes occupé seulement de la répartition du cuivre dans les circuits de la machine. Il nous reste encore à étudier le rôle que joue le fer : nous commencerons par celui qui constitue le noyau de l'induit.

D'une manière générale, on sait que la présence d'un morceau de fer dans un champ magnétique a pour effet de modifier la distribution des lignes de force qui traversent en plus grand nombre le milieu plus magnétique que l'air, c'est-à-dire que l'introduction d'une masse de fer dans un champ magnétique a pour effet d'augmenter l'intensité du champ dans son voisinage. Aussi a-t-on constaté, dès les premières machines construites, que la présence des noyaux de fer doux dans les bobines induites augmentait notablement les effets de l'induction. Ce résultat est celui qui se produit dans toutes les machines sans exception ; toutefois, dans le cas de l'anneau Gramme, il est un peu moins facile de s'en rendre compte.

Nous avons dit déjà que l'on avait cherché à expliquer le

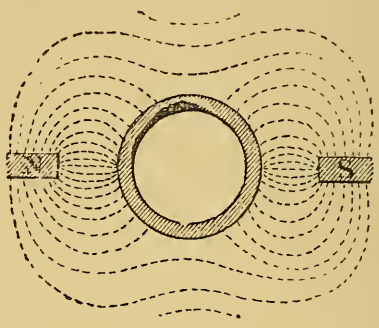
rôle du fer dans l'anneau Gramme, en le considérant simplement comme une sorte d'écran ayant pour effet de supprimer l'action nuisible des inducteurs sur le fil intérieur. Cette théorie s'appuyait sur l'expérience suivante : un champ magnétique étant formé par deux pôles de noms contraires, on sait que les lignes de force forment, entre ces deux pôles, un faisceau qui s'élargit vers le milieu. Si l'on place entre les pôles un anneau de fer doux ayant son axe perpendiculaire à la ligne qui les joint, on constate, en prenant le spectre magnétique dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'anneau, que les lignes de force sont presque complètement supprimées à l'intérieur de l'anneau; d'où cette conclusion que l'anneau de fer forme écran et supprime le champ magnétique dans son intérieur.

D'après ce que nous avons dit plus haut, les lignes de force se déplacent pour passer en plus grand nombre dans le fer; elles doivent donc devenir plus rares, ou même être supprimées presque complètement à l'intérieur de l'anneau, si celui-ci a une épaisseur suffisante. Mais, en même temps, les lignes extérieures se rapprochent et viennent rencontrer en plus grand nombre la surface extérieure de l'anneau; c'est ce qu'indique la *fig.* 45. On voit donc qu'en réalité l'anneau de fer n'a pas seulement pour effet de supprimer les lignes de force qui produiraient une induction nuisible sur les fils intérieurs, mais qu'il augmente en outre l'action sur les fils extérieurs.

Il y a plus, non seulement les lignes de force nuisibles sont supprimées à l'intérieur de l'anneau, mais encore elles sont en partie remplacées par des lignes dirigées en sens inverse des premières, qui produisent alors, sur les fils intérieurs, une induction utile s'ajoutant à l'induction directe sur les fils extérieurs. On peut s'en convaincre en prenant le spectre magnétique dans un plan passant par l'axe de l'anneau et les deux pôles. Soient A l'un des pôles inducteurs, et *pq* la section voisine de l'anneau (*fig.* 46); on constate que les lignes, telles

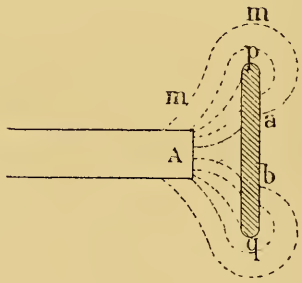
que *m*, *m*, . . ., contournent les bords de l'anneau pour venir aboutir à sa surface intérieure. Dans ces conditions, il est évident que, sauf pour la partie *ab*, il y aura dans les fils intérieurs des courants qui s'ajouteront à ceux des fils extérieurs.

Fig. 45.



Il faut d'ailleurs remarquer que, dans les machines ordinaires, la largeur de l'aimant A est sensiblement égale à *pq*, de sorte que la portion inactive *ab* est réduite à zéro ; c'est-à-dire que finalement, dans l'anneau Gramme, la totalité de la spirale mobile est utilisée pour l'induction.

Fig. 46.



Cette conclusion, tirée de la considération des lignes de force, est du reste conforme à ce que nous avons dit en commençant le présent Chapitre. Nous avons vu en effet que le noyau de fer se trouve lui-même transformé en un véritable aimant, de sorte qu'il faut tenir compte des actions produites dans la spirale mobile, d'une part par ce noyau aimanté, d'autre part par les inducteurs. Or, si l'on envisage la pre-

mière de ces actions, il est évident qu'elle doit se produire aussi bien sur le fil intérieur que sur le fil extérieur et que, dans ce cas, les deux effets s'ajoutent.

Dans la description des machines à courants continus, nous avons vu que, partant de cette idée que le fil intérieur de l'anneau Gramme agit pour augmenter sans profit la résistance de la machine, on a cherché à utiliser ce fil, soit en faisant pénétrer à l'intérieur de l'anneau les épanouissements en fer des inducteurs, comme dans la machine Fein et dans la machine Schwerd et Scharnweber, soit en employant des inducteurs intérieurs, comme dans la machine Jurgensen. Les considérations que nous venons d'exposer montrent pourquoi ces machines n'ont pas donné de meilleurs résultats que la machine Gramme.

Si l'on se reporte à la *fig.* 45, on voit que les lignes de force extérieures à l'anneau se rapprochent de celui-ci pour pénétrer dans le fer; mais on voit aussi que, si les dimensions de l'aimant inducteur dans le sens du diamètre de l'anneau sont faibles par rapport à ce diamètre, c'est seulement dans le voisinage des pôles que les lignes de force viendront rencontrer la surface extérieure de l'anneau sous des angles voisins de 90°; la valeur de cet angle diminuera rapidement et, à une certaine distance des pôles, les lignes de force seront presque tangentes à la surface extérieure de l'anneau. Il est évident que l'on augmentera cet angle en éloignant l'aimant inducteur jusqu'à lui donner un diamètre égal à celui de l'anneau, et en même temps en le munissant d'épanouissements en fer doux, ayant pour effet de faire pénétrer la plus grande partie des lignes de force dans l'anneau, suivant des rayons de celui-ci.

Ces déductions théoriques ont été vérifiées expérimentalement par M. Isenbeck, au moyen d'un appareil consistant en une machine Gramme élémentaire, dont les inducteurs formés de barreaux aimantés pouvaient être munis à volonté de pièces mobiles. En mesurant la force électromotrice aux différents

points du champ, M. Isenbeck a pu constater que non seulement le noyau intérieur, mais aussi les épanouissements polaires, augmentaient considérablement la force électromotrice moyenne.

Nous avons déjà vu qu'il fallait employer pour les machines des inducteurs puissants; la remarque qui précède montre qu'il sera préférable de les faire gros et courts, et qu'on devra en outre les munir d'épanouissements polaires de grandes dimensions. C'est dans cet ordre d'idées que sont construites les nouvelles machines, notamment les machines Edison. Cet inventeur est le premier qui ait construit des machines de grandes dimensions, et, reconnaissant la nécessité d'employer des inducteurs puissants, il les avait primitivement formés au moyen de bobines très allongées, terminées par des blocs de fer, entre lesquels tournait l'induit. Les résultats obtenus avec la machine Marcel Deprez ayant montré l'avantage des inducteurs courts, les nouvelles machines construites en Angleterre, par la Société Edison, sous la direction de M. Hopkinson, furent modifiées dans ce sens, et enfin les machines Edison, qui figuraient à l'exposition de Philadelphie, ont montré que ce perfectionnement avait été également appliqué en Amérique.

Un autre perfectionnement que l'on retrouve dans plusieurs machines, notamment dans la machine Weston, est le suivant. Pour obtenir des inducteurs puissants, on avait d'abord employé plusieurs bobines identiques placées parallèlement les unes aux autres et reliées à une même pièce polaire en fer doux; cette disposition se voit dans les premières machines Weston, dans certains types de machines Gramme et Edison. Or, si l'on considère les portions de deux spires appartenant à deux bobines voisines et situées en regard l'une de l'autre, l'enroulement étant forcément le même dans les deux bobines, on voit que ces portions de fil seront parcourues par des courants de sens contraires, de sorte que le courant qui aimante le noyau d'une bobine tendra en même temps à diminuer le

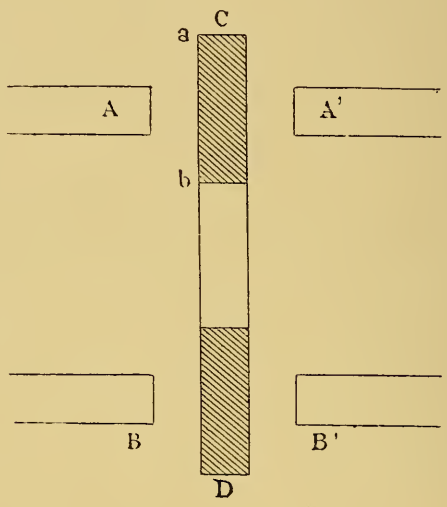
magnétisme du noyau de la bobine voisine. Cet inconvénient est évité si l'on réunit tous les noyaux en un seul, de manière à n'avoir qu'une seule spirale autour de ce noyau.

L'expérience montre en outre que le champ magnétique est plus régulier et plus intense, lorsqu'il est produit par un pôle unique. Il en est de même lorsque, au lieu d'employer les pôles ordinaires des électro-aimants, on les réunit par leurs pôles de même nom, pour obtenir des pôles conséquents, comme cela a lieu dans les machines Gramme, Siemens, Maxim, etc. C'est pour cette raison que M. Marcel Deprez a employé, dans sa machine, des inducteurs à pôles ordinaires; seulement nous avons vu que, pour utiliser les deux extrémités des inducteurs, il a été conduit à employer deux anneaux induits montés sur le même arbre.

Nous avons vu plus haut qu'avec l'induit Gramme il est avantageux d'employer des épanouissements qui embrassent presque complètement la surface latérale de l'anneau. Il est important de remarquer qu'il n'en est plus de même dans les machines à anneau plat, comme la machine Brush où les inducteurs agissent sur les bases de l'anneau. Dans cette machine, les inducteurs sont formés de quatre pôles A, A′, B, B′ (*fig.* 47); on voit immédiatement, d'après la disposition occupée par l'anneau CD entre ces pôles, qu'il y aura avantage à munir les pôles d'épanouissements ayant une largeur égale à *ab*, de manière à faire agir les lignes de force normalement au fil induit. Mais il n'y aura pas avantage à trop augmenter les épanouissements dans le sens de la circonférence de l'anneau, comme cela avait lieu dans les premières machines Brush et Schuckert. En effet, les pôles A et B étant de noms contraires, si l'on rapproche trop les épanouissements, il en résultera qu'un certain nombre de lignes de force, au lieu de se porter de A sur B en passant par le fer de l'anneau, iront directement de A à B et seront alors perdues pour l'induction. M. Sylvanus Thompson, en étudiant la distribution des potentiels autour du collecteur d'une machine Schuckert,

ancien modèle, a trouvé que cette distribution était loin d'être régulière; il se produisait des lignes neutres en dehors de la ligne neutre normale, de sorte qu'on ne recueillait que des différences d'induction. M. Thompson, ayant attribué avec raison ces défauts aux épanouissements polaires des inducteurs, fit modifier les nouvelles machines construites, et l'on en arriva aux machines Victoria, dans lesquelles les inconvénients signalés plus haut ont disparu.

Fig. 47.



Avantages des machines dynamo-électriques. — A propos des machines électriques, il y a une question qui se présente naturellement à l'esprit : c'est de savoir s'il est plus avantageux d'employer des machines magnéto-électriques ou dynamo-électriques. *A priori,* il semble que l'on doive donner la préférence aux premières; car, dans les machines magnéto-électriques, le champ magnétique est produit une fois pour toutes : il ne nécessite donc pas de dépense de travail; en outre, la résistance intérieure de la machine est plus faible, puisqu'elle ne comprend plus que la résistance de l'induit. Cependant les machines dynamo-électriques sont de beaucoup les plus employées et sont en réalité préférables.

Pour s'en rendre compte, il suffit de se rappeler qu'une des conditions que l'on doit chercher à remplir dans une machine, c'est d'avoir un champ magnétique très intense. Lorsqu'il s'agit de machines de petites dimensions, comme la machine Gramme de laboratoire, on peut satisfaire à cette condition en employant des aimants permanents; mais, lorsqu'il s'agit d'établir des machines puissantes, il faudrait, pour obtenir un champ magnétique suffisamment intense, employer des quantités de métal qui augmenteraient dans des proportions considérables le prix et le poids de la machine, tandis qu'au moyen d'électro-aimants on peut obtenir le même champ magnétique avec des dimensions moindres.

Il faut bien remarquer du reste que, lorsqu'on produit un champ magnétique au moyen d'un électro-aimant, il n'y a pas, au moins pendant la marche, d'autre travail dépensé que celui qui sert à échauffer le circuit. On peut s'en rendre compte facilement par l'expérience suivante. On fait passer le courant d'une pile dans une bobine creuse et l'on intercale dans le circuit un galvanomètre qui prend une certaine déviation. On constate alors que cette déviation reste la même, soit que la bobine renferme un noyau de fer doux, soit qu'elle n'en renferme pas; par conséquent, lorsqu'on parle de l'énergie employée à maintenir le champ magnétique, il faut comprendre uniquement l'énergie dépensée sous forme de chaleur dans le circuit inducteur.

Nous ne parlons ici que du courant arrivé à son état de régime; pendant la période variable, c'est-à-dire pendant que l'intensité croît de zéro à sa valeur normale, il n'en est plus de même; il y a un travail dépensé qui varie suivant qu'il y a ou non du fer, dans le voisinage du circuit. Lorsqu'il n'y a pas de fer, ce travail se retrouve tout entier dans l'extra-courant d'ouverture; s'il y a un noyau, l'excédent d'énergie se retrouve à l'état de chaleur dans le fer. L'expérience montre en effet qu'une masse de fer s'échauffe lorsqu'elle est soumise à des aimantations et à des désaimantations successives, ou même

lorsque, après l'avoir aimantée, on fait varier son magnétisme. Cet effet se produit dans les machines électriques qui, comme nous le savons, ne donnent pas des courants absolument continus. On voit qu'il y a là encore une raison pour diminuer les variations du courant, en augmentant le nombre des lames au collecteur.

Ainsi, dans les machines dynamo-électriques, les noyaux de fer, aussi bien dans les inducteurs que dans l'induit, tendent à s'échauffer, non seulement par suite du voisinage du circuit, qui est lui-même échauffé par le passage du courant, mais par les variations du magnétisme dans leur masse. Nous avons vu que dans plusieurs machines on a essayé de diminuer cet échauffement, en laissant circuler l'air entre les différentes parties des noyaux; c'est pour la même raison que, dans la machine Siemens et les machines analogues, les pièces polaires portent des fentes parallèles qui augmentent la surface de métal en contact avec l'air.

Régulation des machines électriques. — Nous venons de voir comment on peut déterminer les principaux éléments d'une machine destinée à un usage donné. Mais il est évident que, dans la pratique, le travail demandé à la machine ne sera pas rigoureusement invariable; il sera même indispensable de lui laisser une certaine élasticité et de pouvoir le faire varier entre certaines limites. Pour n'en citer qu'un exemple, dans le cas de l'éclairage, on doit pouvoir faire varier le nombre des lampes allumées, sans que celles qui continuent à fonctionner en soient influencées. Il est donc nécessaire d'avoir, pour les machines électriques, un mode de régulation, comme on en a un pour les machines à vapeur.

On peut employer, pour cela, différents procédés que nous énumérerons successivement; nous n'entrerons pas ici dans le détail des dispositions matérielles employées pour les réaliser. Ces dispositions sont nombreuses et varient d'ail-

leurs avec la destination de la machine : nous nous contenterons donc d'en résumer les principes.

Dans toute installation électrique, la machine est actionnée par un moteur pourvu lui-même d'un appareil de régulation qui maintient sa vitesse uniforme. On peut, par conséquent, admettre que la vitesse de la machine électrique reste constante, et alors le problème de la régulation se présente de la façon suivante : étant donnés un certain nombre d'appareils récepteurs disposés dans le circuit extérieur d'une machine dont la vitesse est maintenue constante, rendre ces appareils indépendants les uns des autres, de manière qu'on puisse modifier ou même arrêter la marche d'un nombre quelconque d'entre eux, sans que le fonctionnement des autres soit altéré.

Nous ferons remarquer d'abord qu'il y a deux manières de disposer les appareils récepteurs : ou bien ces appareils sont placés en série à la suite les uns des autres, de manière à constituer un circuit unique ; ou bien ils sont placés en dérivation, c'est-à-dire que chacun d'eux est disposé sur un circuit distinct ; tous ces circuits partent de deux points communs plus ou moins éloignés du générateur, que l'on peut, dans tous les cas, considérer comme les pôles de la machine. La première solution présente un inconvénient grave : c'est qu'un accident survenu à l'un des récepteurs, et ayant pour effet de rompre le circuit, entraîne immédiatement l'arrêt de tous les autres. Il y a cependant des cas où des conditions particulières de résistance obligent à employer cette solution sinon complète, au moins en partie, c'est-à-dire que l'on a alors un certain nombre de circuits dérivés renfermant chacun plusieurs récepteurs en série.

Quelle que soit la disposition adoptée, chaque appareil doit, pour pouvoir fonctionner convenablement, être traversé par un courant d'une intensité déterminée. On voit alors que si les appareils sont disposés en série dans un circuit unique, c'est l'intensité générale du courant qu'il s'agit de rendre

constante, cette intensité étant la même pour tous les appareils récepteurs. Dans le cas où, au contraire, ceux-ci sont placés en dérivation, on obtiendra une intensité constante dans chaque circuit dérivé en maintenant constante la différence de potentiel entre les points de dérivation.

La comparaison suivante fera bien comprendre la différence de ces deux dispositions. Imaginons un certain nombre de récepteurs hydrauliques devant être actionnés par l'eau contenue dans un réservoir. Si tous les récepteurs sont échelonnés sur un même canal, partant du réservoir, on voit facilement que l'on obtiendra un fonctionnement régulier en faisant en sorte que chaque appareil soit traversé, dans le même temps, par une quantité d'eau constante, c'est-à-dire qu'on devra régler le débit du canal de manière à le rendre constant, quel que soit le nombre des récepteurs mis en marche. Si, au contraire, chaque récepteur est placé sur un canal spécial partant du réservoir, il est évident que le seul moyen d'obtenir, pour chaque appareil, un fonctionnement régulier et indépendant des autres, sera de maintenir constant le niveau de l'eau dans le réservoir.

Le procédé de régulation le plus simple et qui peut s'appliquer, quelle que soit la disposition des récepteurs, consiste à placer dans le circuit de chacun d'eux un rhéostat qui permet de substituer au récepteur qu'on veut supprimer une résistance inerte que l'on fait varier de manière à maintenir toujours les conditions initiales ; le travail absorbé par le récepteur est alors dépensé à échauffer la résistance inerte qui le remplace. Il est clair que ce procédé n'est pas économique, puisque la dépense reste la même, quel que soit le travail utile recueilli. On voit en outre que, pour des appareils disposés en dérivation, il faudra autant de rhéostats régulateurs que de circuits. Quant à la manœuvre de ces rhéostats, elle pourra être faite à la main, par les soins d'un agent chargé de surveiller en permanence la marche de la machine ; ce système, évidemment le plus simple de tous, a été employé

par Edison. Il est facile également d'imaginer une disposition mécanique permettant de rendre la régulation automatique. Il suffirait, par exemple, de faire commander le commutateur du rhéostat par un régulateur à force centrifuge ; ce dernier serait monté sur un moteur électrique actionné par le courant et sa vitesse angulaire s'accroîtrait avec l'intensité.

Ce procédé de régulation au moyen de résistances additionnelles, qui est surtout applicable au cas d'un circuit unique avec récepteurs en série, consiste en somme à ramener l'intensité à sa valeur, en modifiant la résistance du circuit, la force électromotrice restant constante. Mais il est évident qu'on peut procéder autrement et opérer la régulation en faisant varier convenablement la force électromotrice. Il y a pour cela plusieurs moyens ; l'un d'eux consiste à modifier le calage des balais. Nous savons en effet qu'à une vitesse et à une résistance données correspond une position des balais pour laquelle la force électromotrice est maxima. On peut alors, en déplaçant les balais, modifier cette force électromotrice et par suite l'intensité du courant. Ce procédé a été employé dans la machine Maxim ; il présente l'inconvénient d'occasionner, aux points de contact des frotteurs, des étincelles qui détériorent le collecteur.

Il est alors préférable, pour modifier la force électromotrice de la machine, de faire varier l'intensité du champ magnétique. Pour cela, on peut agir, soit sur la longueur du circuit inducteur, soit sur l'intensité du courant qui le traverse. La première solution, proposée par M. Marcel Deprez, consiste à employer un inducteur sectionné, c'est-à-dire formé de bobines plates ou *galettes*, superposées et reliées entre elles au moyen de touches de cuivre disposées comme les lames d'un collecteur Gramme. Deux frotteurs amènent le courant dans le circuit inducteur et, en se déplaçant sur les touches, permettent de retrancher du circuit un nombre quelconque de galettes.

Si l'on veut, au contraire, faire varier la force électromo-

trice de la machine en agissant sur l'intensité du courant inducteur, il est nécessaire de produire l'excitation des électro-aimants inducteurs au moyen d'un courant distinct. C'est alors ce dernier courant que l'on fait varier pour opérer le réglage dans le circuit principal, soit en intercalant des résistances dans le circuit inducteur, soit en faisant varier la vitesse de la machine excitatrice. Dans ce cas, celle-ci est munie d'un frein commandé par le courant principal; ce sera par exemple un électro-aimant intercalé dans le circuit extérieur qui agira sur une armature à ressort formant frein. Edison a remplacé le frein à frottement par un disque de cuivre monté sur l'arbre de la machine excitatrice et tournant entre les pôles de l'électro-aimant : c'est, comme on le voit, une application de l'expérience de Foucault.

Les différents modes de régulation que nous venons de citer comportent tous des dispositifs mécaniques plus ou moins ingénieux, mais qui ont, dans tous les cas, l'inconvénient d'être paresseux et d'exiger un certain temps pour ramener le courant à sa valeur normale. Ce temps peut alors être assez considérable pour que, dans le cas d'une augmentation d'intensité, les appareils récepteurs soient compromis, avant que la régulation ait produit son effet. On a cherché, pour éviter cet inconvénient, à effectuer la régulation par une disposition convenable des organes électriques de la machine, de façon que, l'inertie des appareils de réglage étant supprimée, la régulation pût se produire d'une façon continue. M. Marcel Deprez, en se servant des propriétés de la caractéristique, a résolu le problème de la régulation dans les deux cas qu'il présente : maintenir constante l'intensité dans le circuit unique, lorsque les appareils récepteurs sont disposés en série; maintenir constante la différence de potentiel aux bornes, lorsque les récepteurs sont placés en dérivation.

Nous avons défini la caractéristique dans le cas d'une machine dynamo-électrique dont les inducteurs sont disposés en série dans le circuit général, et nous avons dit qu'on me-

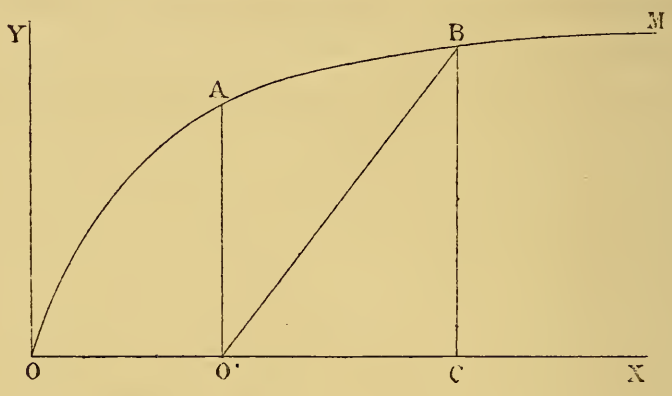
surait les valeurs de l'intensité dans le circuit extérieur, pour en déduire celles de la force électromotrice correspondante. Pour définir la caractéristique d'une façon plus générale, il serait préférable de dire que, les ordonnées de la courbe représentant les valeurs de la force électromotrice, les abscisses représentent les intensités correspondantes *du courant qui parcourt les inducteurs*. Dans le cas où ceux-ci sont en série, le courant qui les traverse a la même intensité que le courant extérieur et, par conséquent, on peut prendre l'un pour l'autre. Mais cette disposition n'est pas la seule employée ; on peut aussi produire l'excitation des électro-aimants inducteurs en plaçant leur circuit en dérivation. Le circuit induit représente alors le circuit principal par rapport aux circuits inducteur et extérieur, qui sont des circuits dérivés. Il en résulte que l'intensité du courant qui passe dans les inducteurs est égale à la différence des intensités du courant qui parcourt l'induit et du courant extérieur. On voit donc que, si l'on a mesuré les intensités dans le circuit extérieur, en faisant varier sa résistance, ce ne sont pas ces valeurs que l'on devra porter en abscisses, mais les valeurs du courant dérivé dans les inducteurs, valeurs que l'on déduira de celles du courant extérieur, en les multipliant par le rapport des résistances des deux circuits.

On peut encore produire l'excitation au moyen d'un courant distinct provenant d'une machine séparée. Si ce courant a une intensité constante, la machine se comporte comme une machine magnéto-électrique dont la caractéristique est une droite parallèle à l'axe des x.

Enfin on peut imaginer que cette dernière disposition est employée concurremment avec une des précédentes, c'est-à-dire que, plaçant sur les inducteurs deux fils enroulés parallèlement, l'un de ces fils serait parcouru par un courant auxiliaire constant, tandis que l'autre relié, soit en dérivation, soit en série, au circuit de la machine serait parcouru par un courant d'intensité variable en général avec les conditions

du circuit extérieur. Supposons, pour fixer les idées, ce circuit placé en série; soient OO′ l'intensité du courant auxiliaire (*fig.* 48) et O′C l'intensité du courant extérieur, pour une certaine valeur de la résistance. Les deux circuits inducteurs étant supposés enroulés côte à côte, l'intensité du courant excitateur est OC, et, si BC est la force électromotrice correspondante, B est un point de la caractéristique. Supposons maintenant qu'on ait tracé la caractéristique OM de la machine, sans faire fonctionner le courant auxiliaire; il est évident qu'à une intensité OC du courant excitateur dans le circuit inducteur relié à la machine correspond encore une

Fig. 48.



force électromotrice égale à BC, c'est-à-dire que la courbe est la même dans les deux cas. Il y a toutefois cette différence que, si l'on fait fonctionner le courant auxiliaire, il faut compter à partir de O′ les intensités du courant de la machine; de plus la résistance totale du circuit est représentée par

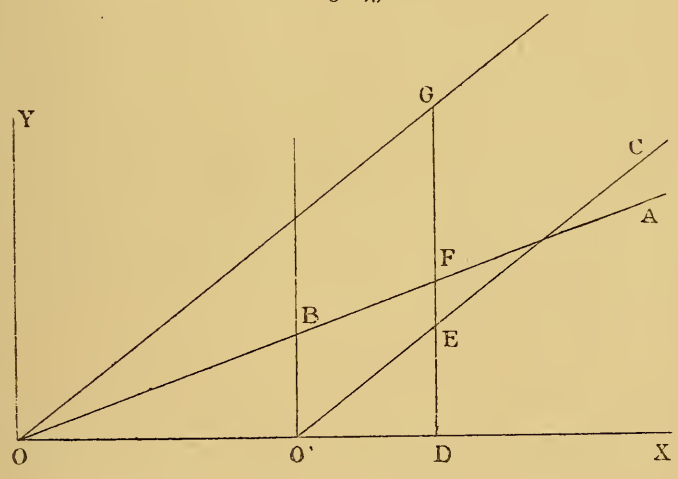
$$\frac{BC}{O'C} = \text{tang}\, B\, O'C.$$

Cela revient à transporter l'origine au point O′; par conséquent, si OAM est la caractéristique de la machine sans le courant auxiliaire, ABM est celle que l'on obtient lorsque le courant auxiliaire fonctionne et O′A représente la force électromotrice due au courant auxiliaire seul.

Ceci posé, examinons d'abord le cas où, les récepteurs étant en dérivation, c'est la différence de potentiel aux bornes de la machine qu'il s'agit de maintenir constante. Nous prendrons une machine possédant un double enroulement semblable à celui que nous venons de décrire. L'un des circuits étant excité par une machine spéciale fournissant un courant constant, l'autre circuit sera disposé en série avec l'induit. Pour que la régulation puisse s'opérer rigoureusement, il est nécessaire d'admettre, comme l'a fait M. Marcel Deprez, que l'intensité ne dépasse pas la limite qui correspond à la première portion de la caractéristique, dans laquelle, la force électromotrice croissant proportionnellement à l'intensité du courant inducteur, la courbe peut être assimilée à une droite passant par l'origine.

Soit alors OA (*fig.* 49) la caractéristique de la machine

Fig. 49.



fonctionnant sans le courant auxiliaire ; lorsque ce courant fonctionne, si son intensité est OO', la caractéristique est représentée par la portion BA. Menons O'C, telle que tang C O'X soit égale à la résistance intérieure R de la machine. On sait que la portion d'ordonnée telle que EF, comprise entre O'C et la caractéristique, représente la différence de potentiel aux bornes. En général, les lignes O'C et OA se coupent et la valeur de EF varie avec la position de l'or-

donnée DF. Il est facile de rendre cette valeur constante; il suffit pour cela de modifier la vitesse de la machine, de manière que la caractéristique devienne parallèle à O'C. On sait en effet que, si OA est la caractéristique pour une vitesse V, on obtient la caractéristique pour une vitesse V' en multipliant par $\frac{V'}{V}$ les ordonnées de la première courbe, ce qui revient à faire tourner la droite OA autour du point O. Pour déterminer la valeur à donner à V', il faudra alors poser

$$\frac{V'}{V} \operatorname{tang} \alpha = R,$$

α désignant l'angle AOX; on en tire

$$V' = \frac{VR}{\operatorname{tang} \alpha}.$$

Si l'on donne à la machine cette vitesse V', la différence de potentiel aux bornes sera invariable, quelles que soient les variations de toute nature dans les circuits extérieurs.

Considérons maintenant le deuxième cas où, les récepteurs étant en série dans le circuit extérieur, c'est l'intensité dans ce circuit qu'il s'agit de maintenir constante. La solution consiste encore à employer un courant excitateur auxiliaire; seulement, dans ce cas, le courant inducteur provenant de la machine est placé en dérivation.

Soient

i et ρ l'intensité et la résistance dans le circuit extérieur;
i' et r' l'intensité et la résistance dans le circuit dérivé inducteur;
$I = i + i'$ et r l'intensité et la résistance dans le circuit induit;
E la force électromotrice de la machine;
U la différence de potentiel aux bornes.

On a

$$i = \frac{U}{\rho}, \quad i' = \frac{U}{r'};$$

d'où

$$I = i + i' = U\left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}\right).$$

D'autre part, la résistance totale est

$$r + \frac{1}{\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}} = \frac{r\left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}\right) + 1}{\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}},$$

donc

$$I = \frac{E\left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}\right)}{r\left(\frac{1}{\rho} + \frac{1}{r'}\right) + 1};$$

égalant les deux valeurs de I, il vient

$$U = \frac{Er'\rho}{(r + r')\rho + rr'}.$$

Donc enfin

$$i = \frac{Er'}{(r + r')\rho + rr'}, \quad i' = \frac{E\rho}{(r + r')\rho + rr'}.$$

Supposons maintenant que, la caractéristique étant tracée pour une vitesse V, on fasse varier cette vitesse de manière que le coefficient angulaire de la caractéristique, qui était d'abord $\tang \alpha$, devienne égal à $r + r'$. L'équation de la caractéristique serait alors

$$y = (r + r')x + e_0,$$

e_0 étant la force électromotrice due au courant auxiliaire agissant seul. La caractéristique représentant la relation qui existe entre E et i', on aura

$$E = (r + r')i' + e_0;$$

substituant dans la valeur de i, il vient

$$\frac{i}{r'} = \frac{(r + r')i' + e_0}{(r + r')\rho + rr'}.$$

Or

$$\frac{\iota}{r'} = \frac{i'}{\rho} = \frac{(r+r')\,i'}{(r+r')\,\rho};$$

donc enfin

$$\frac{\iota}{r'} = \frac{e_0}{rr'} \quad \text{et} \quad \iota = \frac{e_0}{r},$$

c'est-à-dire que la valeur de i est constante, quelles que soient les variations de ρ.

La valeur de la vitesse V' qu'il faut donner à la machine s'obtiendra en posant

$$\frac{V'}{V} \operatorname{tang} \alpha = r + r';$$

d'où

$$V' = \frac{V(r+r')}{\operatorname{tang} \alpha}.$$

On peut remarquer que cette valeur a la même expression que dans le premier cas. En effet, lorsque la machine est excitée en série, sa résistance intérieure R est précisément égale à la somme des résistances du circuit induit et du circuit inducteur.

Nous venons de voir comment l'étude des caractéristiques a conduit M. Marcel Deprez à réaliser dans tous les cas la régulation au moyen d'un courant excitateur auxiliaire. La solution une fois connue, on peut, sans qu'il soit nécessaire de considérer la caractéristique, montrer que cette solution satisfait bien aux conditions du problème et se rendre compte de la manière dont s'opère la régulation [1].

Prenons d'abord le cas de la distribution en dérivation; la machine étant excitée en série, si I est l'intensité dans le circuit principal, le champ magnétique produit par ce courant peut être représenté par le produit KI, à condition toutefois que l'intensité ne dépasse pas une certaine valeur (cas de la caractéristique rectiligne). Plaçons maintenant un circuit

---

[1] Les démonstrations qui suivent sont dues à M. le capitaine du Génie Bertrand.

excitateur auxiliaire parcouru par un courant d'intensité I', le champ magnétique sera alors représenté par une expression de la forme $KI + K'I'$, de sorte que, si V est la vitesse, on pourra écrire, pour la valeur de la force électromotrice,

$$E = V(KI + K'I').$$

Or, d'autre part, on a, en appelant r' la résistance du circuit inducteur relié à la machine, r celle du circuit induit et ρ celle de l'ensemble des circuits dérivés extérieurs,

$$E = (r + r' + \rho)I;$$

donc

$$VKI + VK'I' = (r + r' + \rho)I = (r + r')I + U,$$

U étant la différence de potentiel aux bornes. On voit que, si l'on pose

$$VKI = (r + r')I,$$

d'où

$$V = \frac{r + r'}{K},$$

on aura

$$U = VK'I' = \text{const.}$$

Ainsi, en donnant à la machine une vitesse égale à $\frac{r + r'}{K}$, la différence de potentiel aux bornes sera constante, quelle que soit la valeur de I, cette valeur ne dépassant pas toutefois la limite que nous avons indiquée plus haut. On peut voir, d'après ce que nous avons dit précédemment au sujet de l'amorçage des machines dynamo-électriques (p. 137), que cette valeur de V est précisément la vitesse à laquelle la machine s'amorcerait, le courant auxiliaire ne fonctionnant pas et la résistance extérieure étant nulle.

Passons maintenant au cas de la distribution en série. Nous placerons alors le circuit r' en dérivation. Soient encore i' l'intensité du courant qui le parcourt, i l'intensité de courant extérieur; $I = i + i'$ est alors l'intensité dans l'induit. On a, pour la valeur de la force électromotrice,

$$E = V(Ki' + K'I').$$

D'autre part,

$$E = (i + i')\left(r + \frac{1}{\frac{1}{r'} + \frac{1}{\rho}}\right) = r(i + i') + \frac{r'\rho}{r' + \rho}(i + i')$$

ou, en remarquant que $\frac{\rho}{r' + \rho}(i + i') = i'$,

$$E = r(i + i') + r'i';$$

d'où, en égalant les deux valeurs de E,

$$VKi' + VK'I' = r(i + i') + r'i' = (r + r')i' + ri.$$

On voit, comme précédemment, que, si l'on donne à V la valeur $\frac{r + r'}{K}$, on aura

$$i = \frac{VK'I'}{r} = \text{const.}$$

Nous avons fait remarquer déjà que la disposition des récepteurs en série dans un même circuit présente des inconvénients dans la pratique; aussi la disposition en dérivation est-elle de beaucoup la plus fréquente. Dans ce cas, la solution que nous avons indiquée pour la régulation peut être simplifiée de la manière suivante. Appelons R′ la résistance du circuit auxiliaire parcouru par un courant d'intensité I′. Le circuit inducteur de la machine étant placé en série, nous savons que, si la vitesse V a une valeur convenable, la différence de potentiel U aux bornes de la machine sera constante. Or rien n'empêche à ce moment de considérer le circuit R′ comme un des récepteurs, c'est-à-dire de le placer lui-même en dérivation sur la machine; il est évident qu'on n'aura rien changé aux conditions précédentes, pourvu qu'on ait eu soin de choisir la valeur de R′ de telle sorte que $I' = \frac{U}{R'}$. Il ne sera donc pas nécessaire d'avoir une source excitatrice séparée, et les inducteurs porteront alors deux circuits dont l'un sera placé en série et l'autre en dérivation.

C'est aux machines disposées de cette manière, dont l'usage se répand de plus en plus aujourd'hui, qu'on a donné le nom de machines *compound*.

On voit que la régulation s'opérerait d'une façon rigoureuse si tous les circuits renfermant des récepteurs, y compris le circuit dérivé dans les inducteurs, aboutissaient à deux points communs considérés alors comme les bornes de la machine. Dans la pratique, il n'en est pas toujours ainsi; le plus souvent même, les récepteurs étant à des distances variables de la machine, on se contente, par raison d'économie, d'installer deux conducteurs maîtres sur lesquels viennent se brancher, de distance en distance, les conducteurs secondaires de chaque récepteur. Comme les potentiels vont en décroissant le long des conducteurs maîtres, il y a, d'un branchement à l'autre, une chute de potentiel que l'on peut comparer à la perte de charge le long d'une conduite, de sorte que les récepteurs ne sont pas rigoureusement indépendants les uns des autres. La régulation n'est donc qu'approchée; mais on la rend suffisante pour la pratique, en diminuant, autant qu'on le peut, la résistance des conducteurs maîtres et l'intensité du courant qui les parcourt.

Machines à courants alternatifs. — Les considérations contenues jusqu'à présent dans ce Chapitre sont toutes relatives aux machines à courants continus. On voit qu'elles sont encore loin de rendre compte d'une manière complète et précise des actions très complexes qui se passent dans une machine électrique; néanmoins elles en expliquent un certain nombre. Si maintenant on arrive aux machines à courants alternatifs, on est encore beaucoup moins avancé, et ici les données théoriques font presque complètement défaut. Cela tient à ce que les formules établies pour les courants continus ne s'appliquent plus aux courants alternatifs. Les lois de ces derniers sont encore plus compliquées et ont été encore peu étudiées jusqu'à présent.

Une des difficultés que présente cette étude provient de

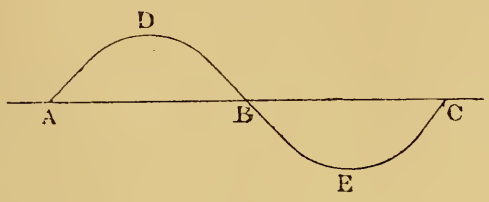
ce que, quand on veut effectuer des mesures sur les courants alternatifs, on se trouve, dès le début, embarrassé pour définir nettement les quantités à mesurer. Lorsqu'il s'est agi, par exemple, de déterminer la force électromotrice d'une machine à courants continus, nous avons pu considérer l'anneau induit comme formé de plusieurs bobines dont chacune donnait naissance à une force électromotrice dépendant seulement de la position de la bobine dans le champ magnétique à un instant donné. Toutes ces forces électromotrices s'ajoutant, la force électromotrice totale se trouvait composée d'une série de termes ayant chacun une valeur bien déterminée, et dès lors il suffisait, pour trouver cette valeur totale, de calculer la force électromotrice moyenne développée dans une bobine et de la multiplier par le nombre des bobines. Cette force électromotrice totale n'était plus soumise alors qu'à des variations dont l'amplitude devenait très faible lorsqu'on augmentait suffisamment le nombre des bobines. On pouvait donc prendre une valeur moyenne différant peu des valeurs extrêmes, pour définir la force électromotrice de la machine.

Avec les courants alternatifs, il n'en est plus de même. Prenons, par exemple, la machine alternative de Siemens et considérons une des bobines induites, depuis l'instant où elle se trouve à égale distance de deux pôles induits consécutifs jusqu'à l'instant où, ayant passé devant un de ces pôles, elle vient occuper une position symétrique de la première. Il est clair que la force électromotrice, qui est d'abord d'un certain sens jusqu'à ce que l'axe de la bobine soit en regard du pôle inducteur, change ensuite de sens pour repasser par les mêmes valeurs absolues, de sorte que la somme algébrique des forces électromotrices développées pendant la période considérée est nulle. En réalité, la force électromotrice moyenne, pendant cette période, est égale à zéro ; on ne peut donc pas la prendre pour définir la force électromotrice de la machine. La même remarque s'applique évidemment à l'intensité qui est égale à chaque instant à la

force électromotrice divisée par la résistance constante du circuit.

On est alors conduit, pour définir la force électromotrice et l'intensité, à ne considérer que les valeurs absolues de ces deux quantités. Prenons, par exemple, l'intensité et représentons ses différentes valeurs par une courbe, en prenant comme abscisses les temps comptés depuis le commencement de la période et pour ordonnées les valeurs correspondantes de l'intensité. Soit AC = T la durée de la période (*fig.* 50), on obtiendra, pour les valeurs de l'intensité i, une

Fig. 50.



sinusoïde, telle que ADBEC. Si nous considérons la demi-période AB, la valeur moyenne de l'intensité sera

$$I = \frac{1}{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} i\,dt = \frac{2}{T} \times \text{surface ADB}.$$

La force électromotrice sera définie d'une manière analogue. Mais on voit alors que ces définitions ne peuvent convenir que pour les applications où le sens du courant est indifférent : c'est le cas de l'éclairage.

Les définitions étant ainsi posées pour des cas particuliers, les mesures n'en restent pas moins difficiles à effectuer. On sait en effet qu'on ne peut employer le galvanomètre dont les déviations dépendent du sens du courant. Ordinairement, pour mesurer l'intensité, on a recours à l'électrodynamomètre, c'est-à-dire que, faisant passer le courant dans deux circuits dont l'un est mobile par rapport à l'autre, on mesure l'action qui s'exerce entre ces deux circuits. Il

résulte des formules d'Ampère que l'action ainsi mesurée est proportionnelle au produit des intensités des deux courants, c'est-à-dire à i^2. L'instrument a été gradué au moyen de courants continus d'intensités connues et une Table donne alors la valeur de i correspondant à chaque déviation du circuit mobile. Il en résulte que l'intensité I′ déduite des indications de l'électrodynamomètre est différente de l'intensité I définie ci-dessus. En effet, le carré de I′ est la moyenne des carrés des intensités, c'est-à-dire qu'on a

$$I'^2 = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} i^2\,dt,$$

ce qui donne pour I′ une valeur différente de I.

En ce qui concerne la force électromotrice, l'indécision est la même. M. Joubert, auquel on doit le peu de travaux théoriques faits sur les machines à courants alternatifs, a montré qu'on pouvait employer l'électromètre à quadrants pour mesurer la différence de potentiel entre deux points d'un circuit parcouru par des courants alternatifs ([1]). Mais là encore, les indications de l'appareil sont fonction de e^2, de sorte que la valeur de E déduite de ces indications ne correspond pas à la définition que nous avons donnée.

Il est évident que ces incorrections dans les mesures n'existeraient pas, si l'on pouvait construire la courbe représentant pendant une période les variations de la force électromotrice, car on pourrait alors se servir de la courbe elle-même, pour faire l'intégration. M. Joubert est arrivé à la tracer, grâce à un dispositif expérimental très simple qui lui permettait de mesurer la force électromotrice à un instant déterminé de la période ; il a constaté ainsi expérimentalement que cette courbe se rapproche beaucoup d'une sinusoïde. On est donc en possession d'une méthode qui

---

([1]) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. XCI, p. 161.

permettrait de mesurer la force électromotrice, telle que nous l'avons définie. Malheureusement cela ne suffit pas pour en déduire l'intensité, car dans ce cas la loi de Ohm ne s'applique pas. Cela tient à ce que les diverses parties d'un circuit parcouru par des courants alternatifs, par suite des variations continuelles de l'intensité, réagissent les unes sur les autres, de sorte qu'avec une même force électromotrice de la machine et une même résistance du circuit extérieur, on peut obtenir des valeurs différentes pour l'intensité, suivant la forme de ce circuit, suivant par exemple qu'il renferme des portions repliées sur elles-mêmes ou qu'il est disposé en ligne droite. Ces influences existent, à n'en pas douter, avec les courants continus; mais, en raison des faibles variations d'intensité, elles sont négligeables; avec les courants alternatifs, au contraire, elles sont de premier ordre et viennent fausser tous les résultats.

Ces variations d'intensité, inhérentes à la nature même des courants alternatifs, ont encore un grave inconvénient au point de vue de l'échauffement des noyaux de fer doux placés dans les bobines induites. Nous avons vu en effet que toute variation du magnétisme dans une pièce de fer se traduit par un échauffement du métal. Avec les courants alternatifs, il y a renversement complet du sens du magnétisme : aussi l'échauffement qui en résulte peut-il devenir assez considérable pour compromettre l'isolement des fils voisins et, dans tous les cas, représente une perte de travail qui diminue le rendement de la machine. C'est pour cette raison que, dans certaines machines, on a préféré se priver du bénéfice du fer doux dans les bobines : telle est la machine Siemens. Dans d'autres, comme la machine Lachaussée-Lambotte, on a divisé le fer, et le noyau est remplacé par des lames laissant au milieu d'elles un vide dans lequel l'air peut circuler. Rappelons également la machine Maquaire où l'on s'est préoccupé de garantir le fil des bobines contre un échauffement accidentel des noyaux. Il faut remarquer en effet

que, si le circuit extérieur vient à être ouvert accidentellement, la machine absorbe brusquement une grande quantité de travail, et comme les inducteurs ne cessent pas d'être alimentés, il en résulte un échauffement dangereux des pièces de fer des bobines induites.

Les remarques que nous venons de faire montrent en résumé qu'au point de vue de la transformation de l'énergie, les machines à courants alternatifs sont inférieures aux machines à courants continus. De plus elles exigent une surveillance plus grande; enfin leur mode de fonctionnement étant plus complexe, on ne peut leur appliquer le calcul avec sécurité et l'on est obligé de s'en tenir uniquement à des lois empiriques et aux résultats de l'expérience.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

CHAPITRE PREMIER.

NOTIONS PRÉLIMINAIRES ET DÉFINITIONS. — UNITÉS.

Expériences de Coulomb 8
Quantité ou masse électrique 10
Densité électrique 12
Tension 13
Potentiel 13
Phénomènes d'influence 22
Capacité 24
Condensation 25
Travail disponible dans les corps électrisés 30
Courant électrique 34
Loi de Ohm 35
Courants dérivés 38
Travail fourni par le courant 40
Magnétisme 41
Actions magnétiques 42
Actions électrodynamiques et électromagnétiques 50
Unités 52
Dimensions des unités mécaniques. Système C.G.S 55
Dimensions des unités électriques 60
Unités pratiques 66

CHAPITRE DEUXIÈME.

DES SOURCES D'ÉLECTRICITÉ.

Propriétés générales 70
Lois de l'induction 72
Premières machines d'induction 77
Classification des machines 86
Machines à courants continus, magnéto-électriques 87
» dynamo-électriques 91
Machines à courants alternatifs, magnéto-électriques 113
» dynamo-électriques 114

CHAPITRE TROISIÈME.

THÉORIE ET PROPRIÉTÉS DES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Calcul de la force électromotrice dans les machines à courants continus 126
Déficit dans la transformation du travail mécanique en travail électrique 133
Propriétés de la caractéristique. Désamorcement 136
Dimensions à donner aux machines 144
Résistances à donner aux inducteurs et à l'induit 147
Du rôle du fer dans les machines 150
Avantages des machines dynamo-électriques 156
Régulation des machines électriques 158
Machines à courants alternatifs 171

ERRATA.

				au lieu de :	*lisez :*
Page	50,	ligne	21,	Oerstedt,	Oersted.
»	117,	»	15, *supprimez :*	représentée	*fig.* 36.
»	118,	»	7	Ganz,	Chertemps.
»	120,	»	13, en remontant, *ajoutez :*		(*fig.* 36).
»	144,	»	3	(p. 177),	(p. 93).

11228 Paris. — Imprimerie de GAUTHIER-VILLARS, quai des Augustins, 55.

COUNTWAY LIBRARY OF MEDICINE
QC
573